RECICLAJE DE RESIDUOS INDUSTRIALES

Residuos sólidos urbanos y fangos de depuradora

XAVIER ELIAS
(Editor)

2ª EDICIÓN

DIAZ DE SANTOS

RECICLAJE DE RESIDUOS INDUSTRIALES

Residuos sólidos urbanos y fangos de depuradora

XAVIER ELIAS
(Editor)

RECICLAJE DE RESIDUOS INDUSTRIALES

Residuos sólidos urbanos y fangos de depuradora

2.ª Edición

DIAZ DE SANTOS

© Xavier Elías, 2009 (Libro en papel)
© Xavier Elias, 2012 (Libro electrónico)

Reservados todos los derechos.

"No está permitida la reproducción total o parcial de este libro, ni su tratamiento informático, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico, por fotocopia, por registro u otros métodos sin el permiso previo y por escrito de los titulares del Copyright"

Ediciones Díaz de Santos, S.A.
Albasanz, 2
28037 MADRID

http.//ediciones.diazdesantos.es
ediciones@díazdesantos.es

ISBN: 978-84-9969-366-8 (Libro electrónico)
ISBN: 978-84-7978-835-3 (Libro en papel)

ÍNDICE DE AUTORES

EDITOR

Xavier Elías Castells
Ingeniero Industrial por la ETSII de Barcelona
(Universidad Politécnica de Cataluña)

Su actividad profesional se desarrolla en diversos ámbitos. Es Director de la Bolsa de Subproductos de Cataluña y Asesor de diversos Gobiernos Sudamericanos en temas ambientales. En la vida profesional ha dirigido Ingenierías donde se han proyectado y construido numerosos secaderos y hornos, tanto de proceso como de incineración y vitrificación de residuos.

En el área docente es profesor de cursos de doctorado y postgrado sobre temáticas de reciclado y tratamiento de residuos: Instituto Químico de Sarriá (Tecnología del Medio Ambiente), Instituto de Tecnología de Cataluña y profesor invitado en numerosas Universidades Españolas y Sudamericanas.

Ha publicado «El reciclaje de residuos industriales» y «Tratamiento y Valorización Energética de Residuos» ambos en Ediciones Díaz de Santos y es el Director de los masters a distancia: «Ingeniería Ambiental» y «Ciencia y Tecnología Cerámica», ambos de la Fundación Universitaria Iberoamericana.

Es Premio Nacional Augusto González de Linares de Medio Ambiente. Es Miembro del Consejo de Dirección de la Agencia de Residuos del Departamento de Medio Ambiente del Gobierno Autónomo Catalán, Vocal del Consejo Asesor de Calidad Ambiental del Departamento de Medio Ambiente del Gobierno Autónomo Catalán, Miembro de las comisiones de Medio Ambiente de numerosos Colegios profesionales, Asociaciones, Corporaciones, etc.

AUTORES

Ramón Altadill Colominas
Ingeniero Industrial por la ETSII de Barcelona
(Universidad Politécnica de Cataluña)

En la actualidad es Director Comercial de la empresa Electrorecycling S.A., donde se reciclan los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos de Cataluña y Baleares. En la vida profesional ha trabajado para varias multinacionales en los sectores eléctrico/electrónico, la logística y el automóvil.

Ha organizado la recogida de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos de los más de 280 puntos de recogida municipal que existen en la actualidad en Cataluña. Forma parte del proyecto «Ecojoguina y R-ciclajoguina» que desde la escuela de comercio internacional intenta buscar soluciones para los residuos provenientes de los juguetes.

Colaborador activo para la Universidad de Cádiz para la organización de las jornadas anuales que se desarrollan en esa provincia sobre el reciclado de aparatos eléctricos y electrónicos.

Su ámbito internacional le ha llevado a desarrollar su trabajo en países de habla inglesa, francesa y alemana.

Ana M.ª Andrés Payán
Doctora en Ciencias Químicas
por la Universidad del País Vasco UPV-EHV

Actualmente es Profesora Titular de Ingeniería Química. Universidad de Cantabria. Dpto. de Ingeniería Química y Química Inorgánica. E.T.S. Ingenieros Industriales y Telecomunicación.

Desarrolla su actividad investigadora, inicialmente en la universidad del País Vasco y posteriormente en la Universidad de Cantabria, en el área de Caracterización, Control y Evaluación Medioambiental de Residuos Industriales y Sedimentos Marinos,

a través de la dirección y colaboración en Proyectos de I+D+I a nivel Nacional y Europeo, tanto de carácter básico como en colaboración con el sector industrial.

Imparte desde 1992, asignaturas propias del área de Ingeniería Química y asignaturas de Medio Ambiente en las titulaciones de Ingeniería Química e Ingeniería Industrial. Participa asimismo en docencia de tercer ciclo dentro de dos Masters con mención de calidad.

Aina Bruno
Ingeniera Técnica Química por la Universidad Politécnica
de Catalunya (UPC), Barcelona (España)

Asesora en Responsabilidad Social para la Dirección Académica de Responsabilidad Social de la Pontificia Universidad Católica del Perú en Lima.

Posée 5 años de experiencia en el campo del medio ambiente, la gestión de residuos y la sostenibilidad. Es autora y coautora de una decena de publicaciones en estos campos.

Jordi Bruno
Doctor en Ciencias Químicas por el Royal
Institute of Technology de Estocolmo (Suecia)

Consejero Delegado de Amphos XXI Consulting SL. Es Doctor en Ciencias Químicas por el Royal Institute of Technology de Estocolmo (Suecia), y posee más de 30 años de experiencia en el campo de la gestión de residuos, análisis de riesgo y estrategias de gestión ambiental. Las principales áreas de experiencia son: asesoramiento y evaluación de riesgo químico; y evaluación del comportamiento y la seguridad de depósitos de residuos nucleares y tóxicos/peligrosos. Desde 2000 es también Director de la Cátedra de Empresa Enresa-Amphos21 de la Universidad Politécnica de Cataluña y Coordinador de Investigación Ambiental de dicha Universidad.

Es autor de más de ciento cincuenta publicaciones científicas referenciadas y tres libros, inclusive el reciente Libro Blanco sobre la Gestión de Residuos Industriales en Cataluña.

Alvaro Marcelo Canales Rojas
Ingeniero Forestal de la P. Universidad Católica de Chile. Master en Ingeniería
y Gestión Ambiental de la Universidad Politécnica de Cataluña

Posee experiencia en el desarrollo y gestión ambiental de proyectos de diversa índole, ha prestado asesorías a instituciones públicas y diversas empresas de los más variados sectores productivos, para el fomento de la gestión sustentable de los recursos.

Ha logrado la implementación y certificación de sistemas de gestión ambiental en empresas constructoras, industriales y pesqueras, con excelentes resultados sobre la eficiencia de las actividades. Realiza además actividades de docencia de pregrado y postgrado en Gestión Ambiental.

Actualmente se desempaña como Asesor en Desarrollo Sustentable en la compañía minera Anglo American Chile desde donde coordina y ejecuta los planes de gestión ambiental y desarrollo comunitario de la División El Soldado.

Amparo Cortés Lucas
Doctora en Farmacia por la Universidad de Barcelona
y Diplomada en Gestión medioambiental por la misma universidad

Su actividad profesional se desarrolla principalmente en el ámbito académico. Es Profesora Titular de Universidad (área de conocimiento Edafología y Química Agrícola) en la Universidad de Barcelona, donde imparte diversas asignaturas de grado y colabora en diversos Másteres oficiales (Planificación Territorial y Gestión Ambiental; Biotecnología Molecular; Agua: Análisis in-

terdisciplinario y gestión sostenible; Gestión de Suelos y Aguas; Gestión y Restauración del Medio Natural; Química avanzada), así como en otros cursos de Postgrado. Ha sido profesor invitado en diversas universidades españolas y sudamericanas.

Sus líneas de investigación son: la Calidad de suelos, sedimentos y aguas subterráneas; y el Saneamiento de suelos, sedimentos y aguas subterráneas contaminados.

Entre los proyectos de investigación más relevantes en los que ha participado en los últimos años se pueden citar:

- Estudio de los valores de fondo de los suelos situados en las áreas industriales de Cataluña con miras al establecimiento de estándares provisionales de calidad. Junta de Residus de la Generalitat de Catalunya.
- Aplicación de métodos magnéticos para la caracterización de suelos contaminados en zonas industriales. Programa Nacional de Ciencias y Tecnologías Medioambientales. Ministerio de Medio Ambiente.
- Integración de técnicas de caracterización de episodios de contaminación de suelos y aguas subterráneas por DNAPLs para la definición de propuestas de rehabilitación de acuíferos. DGCICYT. CTM2005-07824.

Ha actuado como asesora en obras públicas, destacando la asesoría a la Dirección de Obra en temas de caracterización y descontaminación de sedimentos en las obras de desviación del río Llobregat. Asesora también a empresas de consultoría y a algunas administraciones.

Es miembro activo de la COST ACTION 859 «Phytotechnologies to promote sustainable land use management and improve food safety». Miembro del grupo consolidado de investigación: «GEOLOGIA ECONÒMICA y AMBIENTAL e HIDROLOGIA». Miembro de las comisiones de medio ambiente de la Cámara de Comercio de Barcelona y del Colegio de Ingenieros Industriales de Cataluña.

Ha publicado más de una cincuentena de artículos, capítulos de libros, etc. en publicaciones especializadas.

Gloria Díez Bernabé
Cursa arquitectura en la ESTAB (Universidad Politécnica de Cataluña)

Su actividad profesional se inicia en 1998 en el Instituto Tecnológico de la Construcción de Cataluña en el área de I+D, dónde ha colaborado en diversos proyectos de construcción y medio ambiente, tanto a nivel nacional como europeo.

Desde el año 2006 trabaja en la Unidad de Medio Ambiente de iMat–Centro Tecnológico de la Construcción, coordinando proyectos de investigación relacionados con el impacto ambiental del sector de la construcción que vinculan el proceso constructivo con estudios de Análisis de Ciclo de Vida.

En el área docente ha colaborado en el Máster de la ETSAB sobre Materiales dirigido por Fructuoso Mañà y ha realizado diversos cursos de formación sobre gestión de residuos en la construcción.

Ha participado como coautora en las publicaciones siguientes: «Buenas prácticas ambientales en las obras de construcción» (Fundación Biodiversidad-2006), «Prácticas de sostenibilidad en la edificación», (ITeC-2005) «Parámetros de sostenibilidad» (ITeC-2003), «La cubierta captadora» (ITeC-2002).

Xavier Elías Castells
Ingeniero Industrial por la ETSII de Barcelona
(Universidad Politécnica de Cataluña)

Su actividad profesional se desarrolla en diversos ámbitos. Es Director de la BOLSA DE SUBPRODUCTOS de Cataluña y Asesor de diversos Gobiernos Sudamericanos en temas ambientales. En la vida profesional ha dirigido Ingenierías donde se han proyectado y construido numerosos secaderos y hornos, tanto de proceso como de incineración y vitrificación de residuos.

En el área docente es profesor de cursos de doctorado y postgrado sobre temáticas de reciclado y tratamiento de residuos: Instituto Químico de Sarriá (Tecnología del Medio Ambiente), Instituto de Tecnología de Cataluña y profesor invitado en numerosas Universidades Españolas y Sudamericanas.

Ha publicado «El reciclaje de residuos industriales» (Ed. Díaz de Santos), «Tratamiento y Valorización Energética de Residuos» (Ed. Díaz de Santos) y es el Director de los masters a distancia: «Ingeniería Ambiental» y «Ciencia y Tecnología Cerámica», ambos de la Fundación Universitaria Iberoamericana.

Es Premio Nacional Augusto González de Linares de Medio Ambiente. Es Miembro del Consejo de Dirección de la Agencia de Residuos del Departamento de Medio Ambiente del Gobierno Autónomo Catalán, Vocal del Consejo Asesor de Calidad Ambiental del Departamento de Medio Ambiente del Gobierno Autónomo Catalán, Miembro de las comisiones de Medio Ambiente de numerosos Colegios profesionales, Asociaciones, Corporaciones, etc.

Joan Feliubadaló Molins
Ingeniero Industrial por la ETSII de Barcelona
(Universidad Politécnica de Cataluña)

Su actividad profesional se ha desarrollado en el sector textil (tintura y acabado) y, posteriormente y en mayor grado, en la Administración Pública local (Entitat Metropolitana de Serveis Hidràulics i Tractament de Residus), en la que se ha ocupado de multitud de temas relacionados con la gestión de residuos, tanto municipales como industriales y de construccioón y demolición.

Ha intervenido en el diseño, tramitación administrativa, construcción, explotación, clausura, restauración y control ambiental pre y post clausura de buena parte de los depósitos controlados de residuos de dichos tipos establecidos en el área metropolitana de Barcelona desde 1987, así como en el seguimiento de construcción y/o mejoras y control ambiental de otras instalaciones metropolitanas de gestión de residuos como la Planta Incineradora de Besòs y diversas plantas de tratamiento integrado («Ecoparques»).

Es autor o coautor de varias ponencias presentadas a los *Sardinia Symposia*, congresos bianuales de referencia en el ámbito de la deposición controlada y de la gestión de los residuos en general, ademas de diversos artículos en publicaciones especializadas.

Es también Master en Ingeniería y Gestión Ambiental por la Universidad Politécnica de Cataluña y, en el área docente es, desde 2001, profesor coordinador del módulo Residuos Sólidos Urbanos e Industriales de dicho Master, en el que interviene desde 1983.

Xavier Flotats Ripoll
(Terrassa, Vallès Occidental, 1956) es Doctor Ingeniero Industrial por la ETS de Ingenieros Industriales de Barcelona (Universidad Politécnica de Cataluña)

Director del Centro Tecnológico GIRO (Gestión Integral de Residuos Orgánicos) desde 1 de octubre de 2005. Este Centro está impulsado por la Universidad Politécnica de Catalunya (UPC), el Instituto de Investigación y Tecnología Agroalimentaria (IRTA) y el Ayuntamiento de Mollet del Vallès (Barcelona). Profesor Titular, en excedencia, de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Lleida.

Su actividad científica y profesional se ha centrado en la gestión y tratamiento de residuos ganaderos, así como en la modelización matemática de procesos biológicos de reducción de materia orgánica y nutrientes. Estos trabajos han dado lugar a unas 130 publicaciones, entre artículos científicos, técnicos o de opinión, libros y capítulos de libros, unas 60 presentaciones en congresos y del orden de 90 conferencias invitadas en jornadas técnicas. Ha dirigido 69 proyectos finales de carrera de ingeniería (8 premiados) y 6 tesis doctorales. Ha sido responsable de 18 proyectos de investigación y de unos 70 convenios de desarrollo o servicios de asesoramiento con empresas y administraciones. Destacan los convenios de desarrollo sobre combinación de digestión anaerobia y procesos térmicos, que dieron lugar a la planta centralizada de tratamiento de purines de Tracjusa-Juneda (premio a la innovación tecnológica agraria 2003 a la empresa Tracjusa), y en el campo de la actividad profesional destaca el proyecto de la planta de biogás de Mas el Cros, operativa de 1983 a 2003 (premio al ahorro de energía 2001 a la granja Mas el Cros).

Pere Fullana i Palmer
Doctor Ingeniero Industrial por la Universidad Ramon Llull

El Dr. Pere Fullana obtuvo el Premio al mejor Proyecto de Fin de Carrera en Ingeniería Química en el Instituto Químico de Sarriá. Es también Ingeniero Industrial por la Universidad Autónoma de Barcelona y ha cursado estudios de Postgrado en Gestión Empresarial e Informática Química en la Universidad Ramon Llull, en la que obtuvo su doctorado. Actualmente es Director del Grupo de Investigación en Gestión Ambiental de la Escuela Superior de Comercio Internacional (UPF), galardonado con el Premio de Medio Ambiente de la Generalitat de Catalunya 2008, en la categoría de Universidades.

Es sobre gestión ambiental de producto por lo que es más conocida su labor profesional. Es desde sus inicios delegado por España en la redacción de las normas ISO sobre análisis de ciclo de vida (ACV), ecodiseño y ecoetiquetas; y de las normas CEN

de ACV en envases y de ecoetiquetas en materiales de construcción. Su cargo más prestigioso ha sido el de Presidente del Comité de Dirección de Análisis de Ciclo de Vida de SETAC Europa, el máximo exponente mundial en el desarrollo científico de esta metodología.

Ha publicado numerosos artículos científicos y capítulos de libro, siendo autor principal de varios libros sobre ACV con la Generalitat de Catalunya, Rubes Editorial, la Comisión Europea (Programa COST) y AENOR (finales de 2008). También ha publicado «Turismo Sostenible» con Rubes Editorial y «Communication of Life Cycle Information in the Building and Energy Sectors» para el Programa de Medio Ambiente de Naciones Unidas.

Jordi García Martínez
Licenciado en Ciencias Químicas por la Universidad de Barcelona

Ha sido responsable y profesor del *Master en Ingeniería Ambiental* de la Fundación Universitaria Iberoamericana así como del *Curso de Postgrado en Consultoría Medioambiental*. Ha sido coordinador de diversos cursos y seminarios organizados por el Departamento de Medio Ambiente de la Generalitat de Catalunya y la Bolsa de Subproductos de Catalunya.

Ha colaborado en el proyecto *Análisis del Ciclo de Vida de la Generación de Energía Eléctrica* desarrollado por el IDAE y la UAH. Ha sido asesor externo de los proyectos europeos LIFE-Medio Ambiente.

Ha sido responsable del desarrollo de nuevas tecnologías de valorización energética de Tratamiento Técnico de Residuos.

Ha estado vinculado profesionalmente a empresas especializadas en la fabricación, distribución e instalación de equipos para la dosificación de productos químicos y el tratamiento de agua. Ha sido profesor de diversos cursos relacionados con la manipulación de fluidos químicos y los sistemas de tratamiento de agua.

Actualmente pertenece al Departamento de Aguas e Industria de Crison Instruments, empresa especializada en el desarrollo de equipos para la medición y el control de procesos industriales.

Es coautor del libro *Tratamiento y Valorización Energética de Residuos* (Díaz de Santos, 2005)..

Maribel Herrero Municio
Ingeniera Técnica Industrial por la EUTI de Madrid
(Universidad Politécnica de Madrid)

Su actividad profesional se ha desarrollado en diversos ámbitos. Trabaja como ingeniera en una empresa de patentes para el desarrollo de un nuevo producto. Su función consiste en la clasificación de patentes para su posterior estudio técnico y desarrollo del prototipo.

Ha formado parte del departamento técnico en el ámbito de la construcción para el desarrollo de nuevos productos como el hormigón polímero. También ha desempañado funciones de ingeniera de procesos en una empresa de aerogeneradores.

Lorena Jurado de Gracia
Licenciada en Ciencias Ambientales por la Universidad de Girona (España)

Es técnico de medio ambiente del Consejo General de Cámaras de Comercio de Cataluña y de la Bolsa de Subproductos de Cataluña, donde realiza labores de análisis de normativa, asesoramiento y desarrollo de programas intercamerales en relación a la gestión de residuos y las emisiones de CO_2.

Es miembro de varias comisiones técnicas del Departamento de Medio Ambiente del gobierno autónomo catalán en relación con la minimización de residuos y la certificación ambiental, así como de la comisión de medio ambiente de la Cámara de Comercio de Barcelona.

Marga López Martínez
Ingeniera Técnica Agrícola en Explotaciones Agropecuarias (UPC)
y Licenciada en Ciencia y Tecnología de los Alimentos (UB)

Ha estado trabajando en el ámbito de la gestión de residuos desde el año 2001 junto con Montserrat Soliva en la Escuela Superior de Agricultura de Barcelona (Universitat Politècnica de Catalunya), concretamente con lodos de depuradora y residuos orgánicos en general y profundizando en procesos de compostaje, sobre el cual está desarrollando su tesis doctoral. Ha impartido diversos cursos sobre compostaje y gestión de residuos. Actualmente es profesora en la Escuela Superior de Agricultura de Barcelona, participando en asignaturas de análisis químico y gestión de residuos.

Albert Magrí Aloy
Doctor Ingeniero Agrónomo por la Universitat de Lleida

Actualmente forma parte del área de innovación de procesos del GIRO Centro Tecnológico (Mollet del Vallès, Barcelona), donde participa en actividades de investigación y transferencia tecnológica relativas a la gestión y el tratamiento de residuos orgánicos, focalizando su trabajo en la dinámica del nitrógeno.

El manejo de las deyecciones ganaderas, la eliminación biológica de nitrógeno mediante nitrificación-desnitrificación y la modelización matemática de procesos biológicos de tratamiento de residuos, son algunas de sus principales áreas de experiencia, tanto a nivel científico como profesional. En este sentido, ha trabajado en empresas privadas del sector así como en centros públicos de investigación. También ha impartido docencia universitaria y participado en diferentes másteres y cursos de temática ambiental. En la actualidad forma parte del equipo docente del departamento de biología de sistemas de la Universitat de Vic.

Fructuós Mañà Reixach
Dr. Arquitecto por la Universidad Politécnica de Cataluña

Catedrático del Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la ETSAB (UPC). Ex director de la Oficina consultora Técnica del Col·legi Oficial d'Arquitectes de Catalunya. Ex director Adjunto de Investigación del Intitut de Tecnología de la Construcció de Catalunya. Autor de diversos libros y artículos. Asesor a profesionales y administraciones en patología de la edificación y estructuras.

Juan Bautista Menendes Arias
Ingeniero de Minas por la ETSIMO (Universidad de Oviedo).
Profesor de la Universidad Politécnica de Cataluña

Desarrolla la actividad en la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Manresa (EPSEM) en la especialidad de Ingeniería minera como profesor de la asignatura «Impacto Ambiental y Restauración», de especial aplicación a los impactos ligados a la actividad minera. Su actividad profesional siempre ha estado ligada a campos relacionados con la actividad minera y ambiental, donde el tema residuos tiene un tratamiento diferencial. Ha participado en varios trabajos y estudios sobre la problemática ambiental de las escombreras de sal. Ha sido invitado, como profesor, en varias ediciones del Master de Medio Ambiente de la Universidad de Oviedo y en varias ediciones del Curso de Posgrado sobre «Gestión de Residuos municipales, industriales y específicos» de la Universidad Politécnica de Cataluña. Posee amplia experiencia en el diseño y dirección de la recuperación de la morfología en canteras de áridos a cielo abierto mediante el relleno con escombros estériles procedentes de la construcción y obra pública, publicando al respecto en el XI Congreso Internacional de Minería (Zaragoza 2002) y participando en un programa emitido por «2000 ff» (TV3) sobre la misma temática.

Jorge Molina Beltrán
Ingeniero Civil en Minas por la Universidad de Santiago de Chile

Tras especializarse en el área de residuos, su actividad profesional se ha desarrollado en diferentes actividades. Actualmente Ingeniero de Negocios y Proyectos de Grupo Urbaser-kiasa (Chile), Profesor del Master en Gestión Integrada de la Universidad de Cataluña, ex-director por dos temporadas de la Asociación de Empresas y Profesionales por el Medio Ambiente (AEPA, www.aepa.cl), integrante, por dos años, de la mesa de discusión del proyecto de cooperación Chileno-Alemán «Gestión de Residuos Peligrosos en Chile», con la participación de ASIMET, SOFOFA, AEPA, SESMA, MINSAL y CONAMA. ha sido, además, coordinador de proyectos de la Fundación Universitaria Iberoamericana y director académico.

Ha realizado proyectos para empresas e instituciones públicas, sobre gestión de residuos y estudios de impacto ambiental, etc y es Auditor Registrado de Acuerdo de Producción Limpia (INN-Instituto de Normalización Nacional de Chile).

Susana Pombo da Torre
Licenciada en Química (Especialidad Medio Ambiente)
por la Universidade de Santiago de Compostela

Actualmente su actividad profesional se desarrolla en el ámbito de la consultoría ambiental privada (Adantia, S.L.) como Técnico de Medio Ambiente.

Anteriormente fue técnico de Investigación en el Departamento de Modelización Ambiental de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería, donde participó en el convenido entre la Consellería de Medio Ambiente e Desenvolvemento Sostible de la Xunta de Galicia y la Universidade de Santiago de Compostela: «*Implantación de la Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrado de la contaminación en Galicia*».

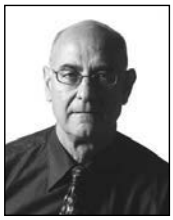
Coautora de guías metodológicas de aplicación de la autorización ambiental integrada en explotaciones porcinas, explotaciones avícolas y en la industria conservera de pescados y mariscos, publicadas por la Consellería de Medio Ambiente e Desenvolvemento Sostible de la Xunta de Galicia.

Ha obtenido la distinción de los cinco mejores expedientes de la 2.ª promoción del Máster en Ingeniería Ambiental impartido por la Universidade de Santiago de Compostela. Su proyecto final de Máster consistió en el Estudio de viabilidad de la recogida y pre-tratamiento de aceites vegetales usados en la provincia de A Coruña.

Rita Puig Vidal
Doctora en Ingeniería Química por el IQS de Barcelona
(Universidad Ramon Llull)

Su actividad profesional se desarrolla dentro de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) como profesora e investigadora. Como investigadora está especializada en temas ambientales, concretamente el Análisis del Ciclo de Vida (ACV) y la Ecología Industrial (EI). Es autora del primer libro sobre Análisis del Ciclo de Vida escrito en español y publicado por la editorial Rubes en 1997. Es Directora de la Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Igualada (UPC). Esta Escuela es uno de los líderes mundiales en la formación sobre ingeniería y tecnología del cuero.

Es actualmente directora también de dos programas de postgrado de la UPC relacionados con la gestión ambiental, el aseguramiento de la calidad y la prevención de riesgos.



Miquel Rigola Lapeña
Ingeniero Químico y Profesor Titular de la Universitat de Girona

Después de ocupar diversos cargos profesionales y directivos en la empresa privada, desde 1990 es Profesor Titular de la Universidad de Girona donde imparte diversas asignaturas de Ciencias Ambientales, con enfoques que van desde la prevención de la contaminación a los diversos aspectos de tratamiento de las corrientes residuales. Es Director del Instituto de Medio Ambiente de la misma Universidad.

También ha sido Director de la Subdivisión de Medio Ambiente y Energía en la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI), teniendo a su cargo la implantación del programa de *Cleaner Production*, entre otras responsabilidades.

Ha publicado «Producción + Limpia» (Ed. Rubes), «Tratamiento de Aguas Industriales» (Ed. Marcombo), y dos manuales para la Generalitat de Cataluña sobre «Prevención en origen de la contaminación en la empresa» y «Prevención de la contaminación en el uso de disolventes», así como capítulos de libros, incluyendo «Risk Reduction through Cleaner Industrial Production» en el libro «Risk reduction-Chemicals and Energy into the 21st century». (Ed. Taylor & Francis), y numerosos artículos tècnicos y científicos.

Participa en las Redes catalana y española de Anàlisis del Ciclo de Vida, y es Miembro del Consejo de Dirección de la Agencia de Residuos del Departamento de Medio Ambiente del Gobierno Autónomo Catalán.

Marta Roca Lamolla
Economista por la Universidad de Barcelona (UB), Master Intervención y Gestión Ambiental (UB), Post-Grado «Economía y Medio Ambiente»(UB), Cursos de medio ambiente y sostenibilidad

Su actividad profesional es en diversos ámbitos. Ha dirigido «l'Escola de la Donna» economista del servicio de medio ambiente, ambos de la Diputación de Barcelona. Conferencias, jornadas, ponencias, miembro de la comisión del Colegio de Economistas de Cataluña, congresos, workshops de expertos, participación en revistas y periódicos, asesoría empresa y entes locales, estudios de medio ambiente y Sostenibilidad.

Docencia: Profesor 20 años del Master; Economía, persona y Sociedad (UB) Economía de la Sostenibilidad en las Cámaras de Comercio de Sabadell y Tarrasa. Y Colegio de Economistas y Registradores de Barcelona. CONAMA.

Publicaciones: «Del paso de la pime a la pime sostenible» publicado por la Conselleria de Medi Ambient i Habitatge de la Generalitat de Catalunya. «Diseño de contenidos mínimos de los indicadores económicos de las Memorias de Sostenibilidad» publicado por el Colegio de Economistas de Cataluña. «Nueva edición del anterior, por Editorial Deusto». «Tratamiento contable de los aspectos medioambientales de la empresa» en proceso de publicación. Conselleria de Medi Ambient. Generalitat de Catalunya. «Empresa XXI; hacer rendible lo sustentable». Editorial Dunken Buenos Aires. «Adaptación y nuevos capítulos para los Países de la Mediterranea» del libro Del paso… (frances, castellano e ingles).

Participación en los libros «Plan de Residuos e Indicadores ambientales Municipales» de la Diputación de Barcelona.

Montserrat Soliva Torrentó
Doctora en Ciencias Químicas por la Universidad Autónoma de Barcelona

Su actividad profesional se ha desarrollado en el ámbito de la docencia y de la investigación y asesoramiento en el ámbito del tratamiento de residuos orgánicos.

Profesora durante más de 30 años de la Escola Superior d'Agricultura de Barcelona-UPC.

Especializada en compostaje y en la caracterización, diagnosis y aplicación al suelo de residuos orgánicos. Ha publicado numerosos artículos y ha participado en proyectos de investigación y congresos relacionados con el tema.

A Pau, mi nieto. Muchas de las ideas, sistemas de fabricación de materiales a partir de residuos, procesos de reciclaje, reutilización perpetua de materiales, etc., que se exponen en esta obra, es posible que yo no los llegue a alcanzar.

Pero estoy seguro de que tú lo verás como una rutina. Así que cuando compruebes algo de ello me lo tienes que contar allá donde yo me encuentre, vivo o reciclado…

Con cariño.

RECONOCIMIENTOS

En primer lugar quiero hacer público mi agradecimiento a los coautores que han intervenido en este libro, sin el concurso de los cuales la obra hubiese quedado incompleta. Sus nombres figuran en el encabezamiento de los capítulos en los que han participado y una breve sinopsis de sus curriculums aparece en las primeras páginas del libro.

Quiero también expresar mi reconocimiento a todas aquellas personas, centros o entidades que desde que se publicó la primera edición me han animado a que siguiera profundizando en los problemas que entraña el reciclaje.

Finalmente también quiero agradecer a todos aquellos que en mayor o menor cuantía han contribuido a que la aparición de este libro sea una realidad: José Luís García Moscoso, Ingeniero Agrónomo por la Escuela Agrícola Panamericana (Bolivia) y Máster en Ingeniería Ambiental de la Empresa (IQS Universidad Ramón Llull, España), y Andrea Allamand Puratic, Ingeniera en Medio Ambiente y RR NN por la Universidad de Viña del Mar, Chile y Máster en Ingeniería y Gestión Ambiental (Universidad Politécnica de Cataluña, España).

PRÓLOGO

La aplicación de las políticas de residuos en los últimos años y el desarrollo de normas específicas para determinados flujos está enfrentándonos con el reto de identificar cual es la gestión más adecuada para los diferentes flujos de residuos de composición diferente y de origen diverso (los industriales, la basura doméstica, los lodos de depuración de las aguas residuales, etc.). Se trata por tanto aplicar la política ambiental en materia de residuos para gestionarlos correctamente, seleccionando en cada caso los tratamientos más adecuados a las características de un residuo, los que sean ambiental y económicamente viables, sin olvidar la proporcionalidad entre los costes asociados a los tratamientos y los resultados obtenidos.

La aplicación de las políticas de gestión de residuos respetando el principio de jerarquía establecido en la normativa de residuos, conduce a tomar medidas para reducir en origen la carga contaminante de los residuos, a disminuir la cantidad de residuos generados, a seleccionar tratamientos adecuados y a fomentar el reciclado de materiales, y por último a la valorización energética frente a la eliminación.

El libro aborda la problemática de los residuos de forma detallada, analizando la problemática de los diversos flujos desde la generación, los problemas de contaminación asociados, las características, y las tecnologías de tratamiento. Como se puede extraer de su título describe múltiples posibilidades de reciclaje de distintos tipos de residuos, incluyendo también aspectos relacionados con la valorización energética. Es sin duda en este contexto una herramienta valiosa para mejorar el conocimiento sobre las posibilidades de reciclaje de residuos de distinta procedencia, y también para facilitar la selección de las tecnologías de tratamiento adecuadas y las posibilidades de valorización energética de los distintos tipos de residuos. En definitiva este libro permite explorar las distintas opciones de gestión y seleccionar las opciones más adecuadas en distintas situaciones para residuos de determinadas características.

La publicación de este libro supone una fuente valiosa de información para las administraciones y los técnicos del sector sobre las posibilidades de las diferentes opciones de gestión. Estamos seguros de que su lectura va a contribuir a orientar una gestión óptima de los residuos.

ELENA ESPINOSA
Ministra de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino

PRESENTACIÓN

Esta *segunda edición* (la primera publicada en 1999) añade problemáticas tan importantes como los residuos domiciliarios, los fangos de depuradora, los residuos de la minería o la biomasa.

La ingente cantidad de residuos que genera nuestra sociedad es percibida por el ciudadano como un problema con connotaciones económicas, un estorbo con implicaciones ambientales y, con frecuencia, como un tema sanitario. En el espíritu de este libro subyace la idea de ir formando especialistas y divulgadores para alterar la percepción de la población y que cambie la idea de un problema hacia la necesidad del recurso material que ahora denostamos como residuos.

El volumen más significativo de la obra estriba en explorar las posibilidades de valorización, o reciclaje, de un sin fin de residuos agrupados por topologías o por sectores productivos. Sin embargo, para poder recuperar y reciclar residuos es preciso conocer las tecnologías que permiten estos procesos de una manera segura. Estos aspectos son los descritos en la primera parte del libro.

El mundo de los procesos industriales se ve de manera muy diferente cuando se enfoca desde la óptica ambiental. El arroz, por ejemplo, es uno de los alimentos básicos para la mayoría de los habitantes del planeta. Su producción masiva emite metano, gas de potente efecto invernadero, el residuo que deja es muy importante pero, en particular la cascarilla constituye, en la mayoría de los países productores un problema ambiental. La pirólisis es una tecnología que permite recuperar la sílice amorfa (uno de los materiales de construcción más sofisticados ya que potencia las características del hormigón) a la vez que permite transformar en energía fácilmente reutilizable la fracción orgánica remanente en la cascarilla.

La cultura imperante en nuestra sociedad industrial ha sido la de producir y tirar. Es decir, ha sido la sociedad de consumo y vertedero hasta que se ha llegado a extremos, que hemos convenido en definirlos como insostenible. Con la globalización de la economía y los medios de producción hay quien piensa que podemos transferir este problema a los países productores. Quizás esto sea posible a corto plazo, pero la realidad se impondrá y todos deberemos empaparnos del reciclaje como cultura de supervivencia.

OBJETIVOS DEL LIBRO

El hilo argumental de la obra sigue fielmente la lógica en que parece vamos descubriendo los habitantes del siglo XXI: la materia prima, incluso la más abundante, no es infinita y con el reciclaje disponemos de una herramienta para poder reutilizar los residuos y volverles a dar vida como materiales. Solo hay que poner un ejemplo para comprenderlo. Un coche nuevo, máximo símbolo de nuestra civilización, es una fuente constante de residuos. Pero cuando es «nuevo» contiene un mínimo del 60% en peso de material reciclado y todo el mundo no se lo plantea, en cambio ponemos mala cara cuando nos enteramos que un material de construcción está hecho a partir de un residuo.

Siguiendo este guión, la publicación se estructura en tres partes. En la primera, que hace las veces realmente de introducción, es el capítulo destinado a la ciencia de los materiales y el reciclaje, puesto que

es un preludio de los restantes capítulos de la obra y señala las posibilidades del reciclaje y su correlación con la ciencia de los materiales.

La segunda parte pasa revista a la lista de residuos, de acuerdo con la clasificación establecida por el Catalogo Europeo de Residuos y, atendiendo básicamente a su naturaleza orgánica o inorgánica, así como las posibilidades de reciclaje que ofrecen de acuerdo con las tecnologías descritas anteriormente. Esta sección pretende desarrollar algunas de las tecnologías disponibles que pueden ser aplicables a los procesos de reciclado de residuos. La finalidad consiste en considerar el tratamiento como una etapa puente que, partiendo de la inertización del residuo, lo transforma y lo valoriza en un material útil o reciclado. Asimismo, también se estudian las tecnologías basadas en los procesos anaerobios y el compostaje en particular como técnica de reciclaje de los residuos orgánicos, dada su enorme importancia y trascendencia actual.

Una vez descritas las tecnologías de tratamiento y valorización aptas para el reciclaje de residuos, se exponen las diversas características y tipologías de los residuos, para explicar como pueden ser valorizados. En líneas generales, la filosofía que puede desprenderse del texto parte del catálogo europeo de residuos pero los va clasificando en residuos livianos de naturaleza orgánica, aptos para su transformación en biocombustibles o materiales de construcción ligeros, dadas sus buenas propiedades de aislamiento térmico y acústico. Mientras que los residuos de naturaleza inorgánica, más densos, son adecuados para su reciclaje en forma de materiales para la construcción, pues presentan altas prestaciones mecánicas. Finalmente existe otra topología de residuos que, de momento, no hay otra alternativa que el tratamiento.

La tercera parte, la más extensa, dedica un capítulo a cada una de las gamas de materiales reciclados que pueden lograrse con residuos industriales, residuos domiciliarios (RSU), fangos de depuradora, residuos mineros, biomasa residual, etc. Cada uno de estos capítulos, hasta un total de diez, esta lleno de ejemplos prácticos de reutilización de residuos. También se hace mención al estado de la tecnología mundial sobre tratamiento de residuos, así como sus previsibles tendencias.

FERNANDO REYERO SUÁREZ
Presidente de la Federación Española de Asociaciones
del Medio Ambiente (FEAMA)

CONTENIDO

Índice de autores IX

Prólogo XIX

Presentación XXI

Capítulo 1. Generalidades, concepto y origen de los residuos 1
(*Xavier Elias*)

Capítulo 2. Clasificación y gfestión de residuos. La Bolsa de Subproductos 43
(*Xavier Elias, Pere Fullana, Jordi Garcia, María Martín, Miquel Rigola, Marta Roca, Josep. M.ª Salas*)

Capítulo 3. Tecnologías aplicables al tratamiento de residuos. Valoración y fabricación de materiales a partir de residuos 91
(*Xavier Elias, Jordi Garcia, Marga López, Montserrat Soliva*)

Capítulo 4. Tipología de los residuos en orden a su reciclaje 173
(*Xavier Elias, Joan Feliubadaló, Xavier Flotats, Jordi Garcia, Albert Magrí, Susana Pombo, Rita Puig*)

Capítulo 5. Residuos destinados a la fabricación de materiales aislantes 261
(*Xavier Elias*)

Capítulo 6. Residuos destinados a la fabricación de materiales densos 339
(*Xavier Elias*)

Capítulo 7. Residuos vitrificables 429
(*Xavier Elias*)

Capítulo 8. Valoración de residuos procedentes de grandes industrias 533
(*Xavier Elias*)

Capítulo 9. Los residuos mineros 637
(*Xavier Elias, Juan B. Menéndez, Jorge Molina*)

Capítulo 10. Aprovechamiento de residuos agrícolas y forestales 697
(*Álvaro Marcelo Canales, Xavier Elias, Maribel Herrero*)
Capítulo 11. Métodos de valoración y tratamiento de residuos municipales 785
(*Xavier Elias*)

Capítulo 12. Vías de tratamiento y valorización de fangos de depuradora 909
(*Xavier Elias*)

Capítulo 13. Los plásticos residuales y sus posibilidades de valoración 997
(*Xavier Elias, Lorena Jurado*)

Capítulo 14. Reciclaje y tratamiento de residuos diversos 1033
(*Ramón Altadill, Ana Andrés, Aina Bruno, Jordi Bruno, Amparo Cortés, Gloria Díez, Xavier Elias, Fructuos Mañá, Enric Ripoll*)

Anexo. Glosario 1155

Índice analítico 1251

Generalidades, conceptos y origen de los residuos

1

Xavier Elias

ÍNDICE

1. Generalidades, conceptos y origen de los residuos 3
1.1. El medio ambiente 3
1.2. Los vectores contaminantes 4
1.3. Introducción a la contaminación atmosférica 6
1.4. Introducción a la contaminación de las aguas 12
1.5. Definiciones sobre residuos 18
1.6. Noción de residuo cero 26
1.7. Los límites del reciclaje 27
1.8. El reciclaje y la ciencia de los materiales .. 28
1.9. La sostenibilidad 32
1.10. Problemas medioambientales comunes en la UE 36
1.11. Noción de ecología industrial 40
Bibliografía 41

RESUMEN

En la primera parte de este capítulo se lleva a cabo una ligera introducción al problema que la contaminación atmosférica, las aguas residuales y los residuos contribuyen al deterioro del ambiente y la salud.

La parte central está destinada a la evaluación de los distintos tipos de residuos que se producen en España, así como la política de gestión a seguir. También se introducen los conceptos de residuo cero y sostenibilidad, en particular la energética.

La parte que hace las veces realmente de introducción es el capítulo destinado a la ciencia de los materiales y el reciclaje, puesto que es un preludio de los restantes capítulos de la obra y señala las posibilidades del reciclaje y su correlación con la ciencia de los materiales.

1. Generalidades, conceptos y origen de los residuos

Este capítulo de carácter introductorio, pretende explicar aquellas definiciones y aspectos más generales que surgen en la relación medio ambiente/residuos. Así, partiendo de la definición de residuo y de la importancia de su generación y distribución; se contextualizarán en el marco de los distintos «vectores ambientales», enfatizándose el hecho de que, al final de los procesos de tratamiento, y tecnologías anticontaminantes, siempre se contabiliza un aumento de residuos. De ahí arranca la necesidad del reciclaje.

De esta forma se produce la aparente paradoja, de que a medida que se depuran las aguas residuales y las emisiones atmosféricas, se generan más residuos sólidos. Ello es debido a que en lugar de diluir y dispersar los contaminantes en el río, mar, o atmósfera, estos se separan y concentran en forma de fangos y residuos en fase sólida (lodos, polvos...), apareciendo como resultado final. Es decir, cuanto más se depura, mayor es el volumen de residuos generados. Como quiera que en muchos casos la polución es un efecto de la «ineficiencia» del sistema de producción, con la instalación del sistema de separación/concentración, se producen dos efectos:

- La polución se cuantifica en forma de residuo y se pone de relieve de manera estridente la ineficiencia productiva.
- La gestión de este residuo supone un coste que debe asumirse.

El residuo generado por la producción de una tonelada de acero, pasta de papel o fibra artificial se ha reducido sustancialmente en los últimos años, como consecuencia de implantarse sistemas productivos mucho menos contaminantes, denominados limpios, por ejemplo las BAT's (*Best Aviable Technology*).

El avance tecnológico afortunadamente, en la gran mayoría de casos, va a favor de una mayor eficiencia productiva e incluso los nuevos equipos y factorías, desde su inicio, incorporan el concepto de minimización del impacto ambiental, con lo que su incidencia por tonelada producida es progresivamente menor. El único freno en esta dirección proviene de tres aspectos:

- La garantía sanitaria, especialmente en la industria alimentaria. Es decir, este sector no permite el uso de determinados subproductos recuperados (caso de las harinas cárnicas) o el empleo de envases reciclados.
- Aquellos sistemas productivos abastecedores y productores «just in time» que generen polución con el cambio de producción.
- Los controles destructivos para verificar la calidad.

Así mismo, se comentarán aquellos aspectos sobre la gestión de residuos surgidos a partir de las directrices políticas internacionales, que han determinado la urgente necesidad de reciclar, apareciendo dentro de este apartado, la viabilidad de las Bolsas de Residuos como herramienta de gestión. Todos estos principios están contenidos en el documento sobre Crecimiento y Sostenibilidad que en el año 1992 elaboró la Comisión Europea.

En los capítulos destinados a los residuos, se indicará claramente la jerarquía de los principios aplicables a la gestión de los residuos, que empieza por la minimización, sigue con la valorización y termina con los tratamientos finalistas de los residuos.

Al final del capítulo, también se recogerá de forma sintética, la importancia que la energía tiene en el reciclaje; además de realizar una breve incursión introductoria a la nueva herramienta ambiental que representa el análisis del ciclo de vida (ACV).

1.1. EL MEDIO AMBIENTE

En primer lugar, es necesario introducir el concepto de medio ambiente debido a la importancia que juega en el contexto de esta obra. La complejidad y alcance de las connotaciones asociadas con el medio ambiente requiere siempre de un análisis multidisciplinar, que contemple desde todas las facetas, la creciente relación del binomio sociedad/medio.

El medio ambiente podría definirse como el conjunto de sistemas físicos y biológicos que aparecen como resultado de la interacción del hombre moderno con el hábitat que le rodea.

Es evidente que el desarrollo de la definición del párrafo anterior, tan escueta, será interpretado de manera completamente diferente según la formación de las personas que analicen un mismo fenómeno, así, por ejemplo, la hipotética afectación al medio ambiente que ocasionará la implantación de un polí-

gono industrial, podría ser interpretado de la siguiente manera:

- El biólogo analizaría el impacto que la construcción y funcionamiento del conglomerado industrial ejercería sobre la flora y fauna local.
- El urbanista se decantaría por los problemas derivados de la ocupación del suelo, o los efectos que el incremento del tráfico provocaría sobre las poblaciones vecinas.
- El ingeniero atendería a los problemas de infraestructura sanitaria, que incluiría la evacuación de los efluentes y la contaminación atmosférica.
- El geólogo prestaría más atención a la alteración de las aguas subterráneas y a la posible contaminación del subsuelo.
- El sociólogo analizaría el impacto que el funcionamiento de la actividad industrial ejerce sobre las personas y su modo de vida.
- El médico dedicaría sus esfuerzos a prevenir los efectos que el desarrollo de la citada actividad pudiera ejercer sobre la salud de los vecinos.

Así, se podría ir citando la perspectiva y actitud de los diversos profesionales frente a un determinado escenario. Con lo cual, debería convenirse que el medio ambiente admite un análisis multidisciplinar, donde cada profesional puede aportar su conocimiento específico que permita hacer más compatible las actividades de la sociedad contemporánea con su entorno.

Tomando como punto de partida la reciente historia contemporánea, dicha relación persona/medio, se encuentra muy condicionada, con independencia que durante el último siglo la humanidad ha conseguido un indudable nivel de bienestar a base de una potente industrialización, que ha desplazado a gran parte de la población hacia las ciudades, habiéndose desarrollado espectacularmente. Existen tres factores importantes: *demografía*, *densidad de población* e *industrialización* que han alterado profundamente la relación sociedad/medio, precisándose de múltiples mecanismos para recuperar el equilibrio de aquello que se ha convenido en denominar medio ambiente.

El gráfico de la Figura 1.1 indica que, a partir de 1950 década siguiente a la finalización de la segunda guerra mundial, el incremento de la actividad industrial ha sido incesante. Aquí surge una pregunta inquietante desde la óptica ambiental: ¿Hasta donde se

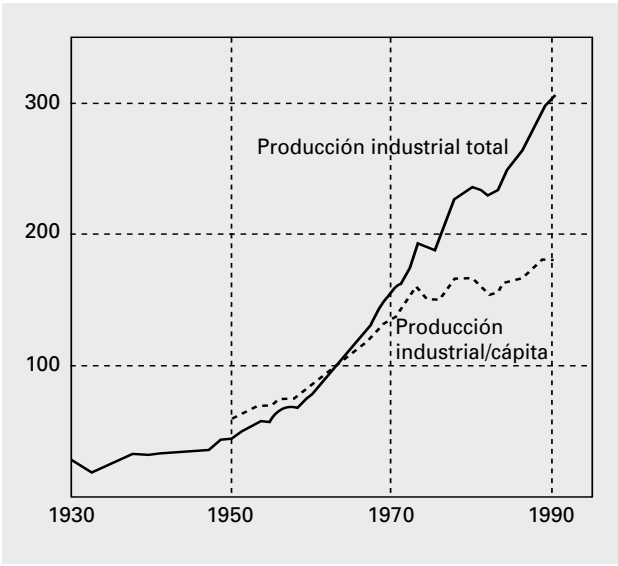


Figura 1.1. Producción industrial en el mundo. Índice (1993 = 100).
(Fuente: Naciones Unidas. Oficina sobre población).

puede crecer? La gráfica a trazo discontinuo indica que se tiende a una cierta estabilización y ello es debido a que, si bien la producción industrial ha aumentado, la demografía lo ha hecho en mayor proporción, con lo que el cociente tiende a mantenerse. Sin embargo, una mayor población equivale a una agricultura más intensiva, más servicios, más residuos, más energía, etc. Y ello conduce a otra pregunta clave en el terreno del medio ambiente ¿Un desarrollo sostenible es compatible con un incremento sin límite de la población?

1.2. LOS VECTORES CONTAMINANTES

Una de las primeras facetas que deberían abordarse para el estudio del problema, consiste en analizar las vías por las que se produce la afectación del medio ambiente. Los diversos impactos ambientales, es decir, los posibles efectos negativos provocados sobre el medio ocasionados por el flujo de materias primas, energía o emisiones, se ha convenido estructurarlos en varios factores, denominados vectores contaminantes, que sintéticamente son:

- *Aire*: La calidad del aire, así como el ruido son dos parámetros básicos con los que se evalúa el estándar de vida. Con el término aire se engloba todo el flujo de contaminantes que emanan del tráfico, la generación de electricidad, la industria, calefacciones, etc.

- *Agua*: La contaminación del agua puede tener un origen difuso, como sucede por ejemplo con las prácticas agrícolas, o bien proviene de los vertidos de aguas residuales que aparecen como resultado de las diversas actividades industriales, urbanas, turísticas, etc. Estas aguas deben depurarse antes de ser devueltas al río o al mar, debido a su alta carga contaminante. El agua actúa como disolvente y soporte físico que transporta los contaminantes que se han vertido en ella. En general los países disponen de una legislación que señala los límites máximos de contaminantes que pueden contener estas aguas antes de ser vertidas al cauce público.
- *Residuos*: que actúan como vectores de todo tipo, siendo el último eslabón de cualquier actividad, ya sea doméstica, industrial, agrícola, etc. Por ejemplo, el agua residual, una vez depurada deja un residuo denominado fango. La finalidad básica de toda depuración consiste en transferir el contaminante de un medio muy difundible, como es el agua, a otro más controlable como es el fango. Lo mismo acontece con los gases. El gas es el medio más fácilmente expandible y, por tanto, contaminante. La instalación de un filtro, o un equipo de tratamiento de la corriente gaseosa, retira los elementos de la corriente gaseosa y los transfiere a un medio sólido o líquido.
- *Utilización de la energía*: la energía, en cualquiera de sus formas, está omnipresente en nuestra vida. El nivel de desarrollo de un país es generalmente función de este parámetro, puesto que la energía interviene en la inmensa mayoría de procesos de fabricación, transporte, climatización, etc. Su generación, transporte, transformación y usos, provoca una afectación al medio.
- *Ruido, olores*: Estos vectores ampliamente distribuidos en las sociedades industriales, afectan directamente a la calidad de vida. Cuando su intensidad y/o persistencia es pertinaz pueden adquirir carácter patológico.

Para ilustrar, aunque sea de manera indirecta, la importancia asignada a los diversos vectores, se acompaña el histograma de la Figura 1.2 que representa las inversiones que los países destinan a cada uno de ellos. En 2001, el sector público de la UE ha invertido casi 54.000 millones de euros, lo que se traduce en el 0,6% del PIB de la UE, los gastos de los servicios 75.000 millones y la industria 38.000 millones de euros. Según la Oficina Europea de Estadística (Eurostat), entre 1996 y 2002 los gastos en medio ambiente procedentes del sector público aumentaron en un 6%.

En el 2005, estas cifras eran muy superiores. En la UE, y también en los EE UU, la legislación obliga a tomar medidas para la protección del medio ambiente. Así, por ejemplo, en la UE es obligatorio depurar las aguas residuales en poblaciones de más de 2.000 habitantes. Ello equivale a decir que el monto económico que se deberá destinar a ejecutar esta legislación obligará a unas cuantiosas inversiones.

Según fuentes procedentes de las Agrupaciones Empresariales de Tratamiento de Residuos Industriales, en comunicaciones llevadas a cabo en la Feria Tem/Tecma (Madrid 2006), el sector español de residuos industriales facturó, en 2005, 830 millones de €, cifra que espera incrementar en un 7,8% en 2006.

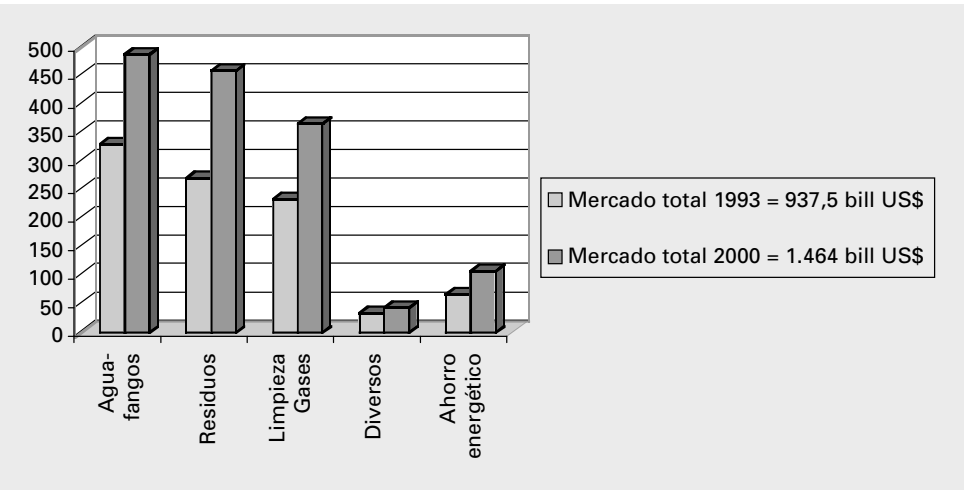


Figura 1.2. Inversiones que los países dedican a cada vector contaminante.

En contrapartida, un estudio llevado a cabo por el Banco Mundial presenta como resultado que la mala gestión ambiental derivada de prácticas ilegales o corrupción es los aspectos de manejo forestal y biodiversidad provoca un daño económico mundial cercano a los 30.000 millones de dólares americanos al año. De este total entre 15.000 y 20.000 millones se atrubuyen a pérdidas fiscales por explotaciones forestales; 9.000 millones se deben a la pesca salvaje; y entre 6.000 y 10.000 millones se atribuyen al tráfico de especies.

En los países en vías de desarrollo el daño económico causado por la mala gestión de sus recursos y valores naturales puede estimarse entre un 4 a 8% de su PIB.

1.3. INTRODUCCIÓN A LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

La atmósfera es un reservorio ambiental muy extenso y constituye el destino de la mayor parte de los contaminantes que arroja el hombre. Algunos de los compuestos emitidos son muy ligeros y persistentes lo que produce un impacto a largo plazo de consecuencias insospechadas, sirva de ejemplo el caso de los freones y la disminución de la capa de ozono estratosférico.

Se puede definir la contaminación atmosférica como la presencia en el aire de sustancias, o formas de energía, que impliquen riesgo, daño o molestia grave para personas, animales o bienes de cualquier tipo.

Las alteraciones del aire pueden ser:

- Físicas (calor, radiaciones,...).
- Químicas: naturales (polvo, SO_2,...) o artificiales (CO, COV's,...).
- Biológicas (microorganismos, bacterias, esporas...).

Cerca de un 80% de la población de la UE vive en núcleos urbanos. La conjunción del tráfico, las calefacciones, las industrias próximas y el propio clima generan una serie de interacciones entre los diversos vectores y los parámetros de intervención: meteorológicos, demográficos, energéticos, topográficos, urbanísticos, etc., que desequilibran el ecosistema urbano y conforman un escenario agresivo con el medio receptor: los ciudadanos.

La atmósfera urbana puede considerarse como un inmenso reactor químico extremadamente complejo donde se forman, de manera permanente, una serie de compuestos químicos ajenos a la composición normal de la atmósfera y que son respirados habitualmente por las personas.

Las principales fuentes contaminantes se hallan reflejadas en la Figura 1.3.

Estos valores corresponden a Cataluña. Dividiendo esta cifra por los 6.000.000 de habitantes y los días del año, se llega a la conclusión de que cada ciudadano emite a la atmósfera casi 16 kg de gases contaminantes por día.

1.3.1. Emisión e inmisión

En términos muy sencillos la emisión puede definirse como la cantidad de contaminantes que un foco fijo, una chimenea, o móvil, un vehiculo, lanza a la atmósfera. Por tanto, sus límites deberán ser fijados por las autoridades ambientales.

La inmisión puede definirse como el efecto que produce sobre las personas las dispersiones atmosféricas de las emisiones. En este sentido puede afirmarse que los límites que deberán imponerse a las inmisiones, las deberá fijar la autoridad sanitaria. Un estudio realizado entre 2002 y 2005 en seis ciudades europeas, entre ellas Madrid, ha demostrado que la cantidad de contaminación a la que estamos expuestos puede ser, en contra de lo que se creía, muy diferente al nivel propio de la ciudad de residencia. Es decir, se puede vivir en una ciudad muy polucionante y los ciudadanos permanecer a salvo de la contaminación y viceversa. Así, en Cataluña, el Departamento

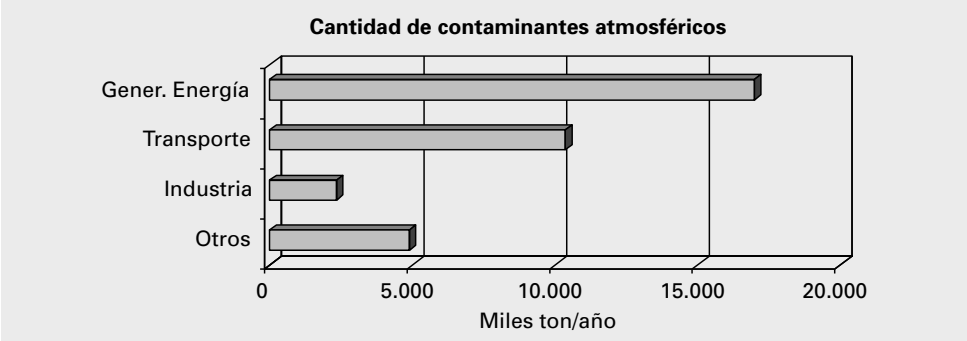


Figura 1.3. Origen de los contaminantes atmosféricos.

de Medio Ambiente tiene instalada una red de las más extensas y densas a nivel mundial (XVPCA), no obstante, los expertos concluyen que, de momento, la citada distribución espacial no permite extrapolar valores de la calidad del aire de una parte del territorio a otras. Otro ejemplo de lo expuesto lo constituye la medida de plomo, en su mayor parte debida al consumo de gasolina con plomo. La Directiva 1999/CE/30 establece un límite de 0,5 $\mu g/m^3$ que, si bien no se alcanza en ninguna zona del territorio del área metropolitana de Barcelona, los máximos valores se registran en Sant Llorenç dels Hortons, pequeña localidad alejada de Barcelona.

La Figura 1.4 esquematiza, la interacción de una forma de contaminación atmosférica con la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas. La deposición sobre el terreno, puede dar lugar a fenómenos de contaminación de suelos.

1.3.2. Los contaminantes atmosféricos

Una breve referencia a los principales grupos de contaminantes atmosféricos comprendería:

- *Dióxido de carbono CO_2.* Las actividades naturales generan una gran cantidad de CO_2, y se calcula que tan sólo el 5% es de origen antropogénico. Sin embargo, no es aconsejable menospreciar dicha cantidad, ya que, por desgracia, va en aumento cada día contribuyendo de manera decisiva al efecto invernadero. En España, el transporte es el mayor emisor de CO_2. Curiosamente, según un estudio de la Universidad de Columbia en Nueva York (publicado en la revista *Nature*), el aumento de CO_2 podría hacer aumentar los recursos de agua dulce y el riesgo de inundaciones. El CO_2 reduce la capacidad de transpiración de los vegetales y ello se traduce en que las plantas absorben menos agua del suelo.
- *Óxidos de azufre SO_x.* La fuente antropogénica principal procede de la combustión de algunos combustibles fósiles (carbones y derivados del petróleo). Es irritante, soluble en agua y su vida media en la atmósfera es de de pocos días. El efecto más conocido sobre el medio es la lluvia ácida pero en el organismo de los seres vivos provoca todo un sinfín de alteraciones como: disminución de la flora intestinal, afectación al sistema cardiovascular, irritaciones en el sistema respiratorio, mucosas, etc. Los SO_x también provocan oxidaciones en los metales férricos y edificios.
- *Monóxido de carbono CO.* Es un componente que tiene su origen principal en una oxidación parcial del carbono, fruto de las combustiones incompletas. Dentro las áreas urbanas el principal responsable de la presencia de CO, es el tráfico. Concentraciones de 50 a 100 ppm son peligrosas para las personas. Otras zonas de generación son los vertederos (descomposición anaerobia de la materia orgánica). El principal riesgo del CO es su afinidad por la hemoglobina (300 veces superior que por el oxigeno), lo que puede conducir a intoxicaciones letales. Su vida media en la atmósfera es de un mes.
- *Óxidos de nitrógeno NO_x.* Los óxidos de nitrógeno tienen un origen antropogénico como consecuencia de combustiones a alta temperatura y aparecen como resultado de la combinación del oxígeno con el nitrógeno atmosférico. Su vida en ella es muy larga. La formación de NO_x es directamente proporcional al exceso

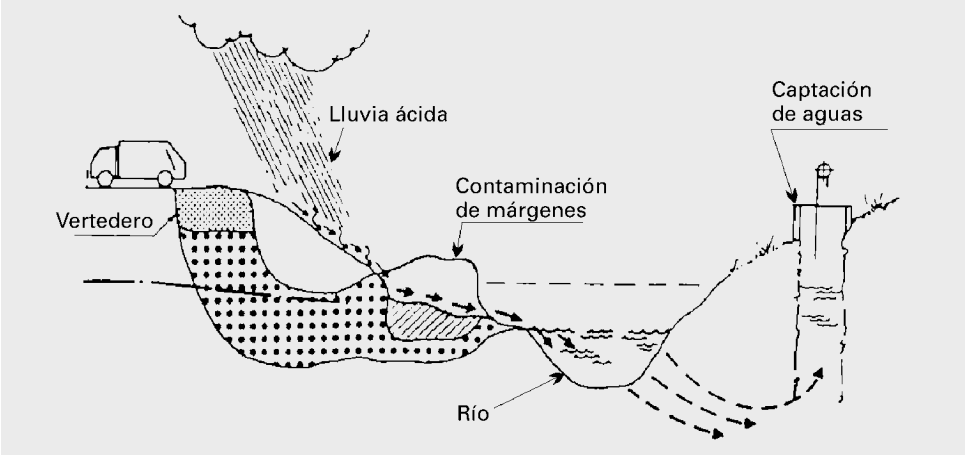


Figura 1.4. Repercusión de la contaminación atmosférica.

de aire en las combustiones y a la temperatura. A partir de 10 ppm causa irritaciones en las mucosas y en el sistema respiratorio. El NO puede unirse al CO para reducir la capacidad de transporte de oxígeno a las proteínas.

- *Sulfuro de hidrógeno H_2S.* Presente en todas las reacciones de fermentación anaerobia. Desprende un olor desagradable (huevos podridos) que lo delata. En mayores proporciones es un gas letal. Liberado a la atmósfera se oxida a SO_2.
- *Metano CH_4.* Las fuentes principales son las emisiones fugitivas en el transporte de gas natural desde la zona de extracción hasta las plantas de combustión, los incendios, las emisiones de biogás de vertederos, la ganadería, etc. La reducción de CH_4 en la atmósfera se considera factible, por ser un compuesto que puede ser aprovechado como fuente energética alternativa. Tiene más eficacia que el CO_2 en el proceso de absorción de la radiación terrestre (unas 25 veces más), aunque su contribución al efecto invernadero es menor, ya que su concentración atmosférica es más pequeña. Se calcula que su presencia en la atmósfera es de unos 11 años.
- *Ozono O_3.* Es un contaminante secundario, es decir que no procede directamente de ningún foco emisor, sino que es fruto de reacciones químicas de otros contaminantes. Por motivos naturales el ozono se genera por causa de las descargas eléctricas en las tormentas. Su acción en la zona estratosférica es fundamental para neutralizar la acción de los rayos ultravioletas procedentes del sol; aunque a nivel troposférico (zona de la atmósfera donde respiramos) sea contemplado como un gas irritante y de fuerte poder oxidante, por lo que su presencia incontrolada en el suelo es perjudicial para las personas.
- *Hidrocarburos C_nH_m.* La contaminación atmosférica de estos compuestos presenta diversos problemas, especialmente con los hidrocarburos aromáticos que son tóxicos, pero su presencia en la atmósfera contribuye a la formación del «smog» fotoquímico. Las principales fuentes de producción de estos compuestos son las emisiones de los automóviles y las procedentes de las industrias petroquímicas. Algunos COV muy volátiles y reactivos, como los halocarbonos, alcanzan la estratosfera y destruyen el ozono.
- *Partículas.* Existen múltiples fuentes de generación de partículas, tanto por causas naturales como antrópicas. Las partículas se pueden diferenciar entre sedimentables, de tamaño superior a 30 micras y en suspensión inferiores a 30 micras. Las partículas en suspensión suelen ser las más perjudiciales para el organismo ya que se inhalan fácilmente. La composición química es muy variable y en combinación con otros contaminantes pueden incrementar significativamente sus efectos nocivos. En las áreas urbanas suelen estar provocadas por la combustión y contienen gran cantidad de HPA (hidrocarburos poliaromáticos) y también COV's y organoclorados. Pueden permanecer en la atmósfera largos períodos de tiempo antes de caer.
- *Humos.* Se podrían definir como un aerosol formado por polvos de tamaño inferior a la micra. Están compuestos por partículas sólidas como carbono, olefinas, metales, etc. La combinación de alguno de estos compuestos como anhídrido sulfuroso, ácido sulfhídrico, ozono, fibras, metales junto a determinadas condiciones climáticas puede provocar un efecto muy negativo para la salud.

El color del humo está en relación con la cantidad y cualidad de contaminantes que contiene. Así:

- Humo blanco o gris suele ser debido a una insuficiente temperatura de combustión de la materia orgánica. Cuando la temperatura de la chimenea se halla entre 150 y 250 ℃ los hidrocarburos remanentes y/o formados por la insuficiente combustión, condensan y forman aerosoles que dan lugar a este color. La presencia de compuestos inorgánicos también origina esta tonalidad de color. Finalmente hay compuestos que tienen color definido: los compuestos de azufre son de color amarillo y los óxidos de calcio grises.
- Humo negros generados cuando la combustión es deficitaria en oxígeno. Los hidrocarburos se reducen parcialmente y aparecen partículas de carbón (hollín). Se generan, normalmente, en procesos de pirólisis.

En la Tabla 1.1 aparece la contribución de algunos gases de efecto invernadero (no hay que olvidar que el vapor de agua es también gas de efecto invernadero que, por razones obvias, no se incluye en la lista de gases contaminantes), los más representativos, y los límites de su presencia en la atmósfera que marca la Directiva 1999/30/CE.

Tabla 1.1. Algunos gases de efecto invernadero y límites de inmisión

Contaminante	GWP	Directiva 1999/30/CE µg/m³
CO_2	1	
CH_4	24,5	
N_2O	320	40
SO_2	—	20
CO	—	10
H_2S	—	
CFC-11	4.000	
CFC-12	8.500	
CFC-13	11.700	
CFC-113	5.000	
CFC-114	9.300	
HCFC-22	1.700	
HCFC-123	93	
HCFC-124	480	
HCFC-141b	630	
HCFC-142b	2.000	
HCFC-225ca	170	
CCl_4	1.400	
Halon-1301	5.600	

Otros componentes presentes en el aire son los metales. Aunque la cantidad siempre suele ser pequeña, sus efectos son muy tóxicos. Algunos de ellos proceden de las actividades industriales, del tráfico, de la minería, de la incineración de residuos, etc. y, debido a sus efectos sobre la salud de las personas, vale la pena resaltar:

- *Mercurio (Hg).* Es quizás el más nocivo de los metales. Su poder de difusión es enorme debido a su baja temperatura de evaporación (prácticamente la ambiente). Su concentración es particularmente alta en zonas frías (polos) y montañosas. La exposición a pequeñas dosis provoca daños irreversibles en el cerebro, sistema nervioso y riñones. Provoca un progresivo debilitamiento de los músculos, ceguera, parálisis, coma, deformaciones en los fetos y la muerte. La UE estudia la posibilidad de prohibir su empleo para la fabricación de instrumentos (Se calcula que al año se emplean mas de 30 toneladas de Hg para la fabricación de termómetros). La industria del cloro emite mucho mercurio. Este metal también va a ser prohibido en la fabricación de materiales electrónicos.
- *Arsénico:* El metabolismo y la potencial toxicidad de este elemento se ven complicados por la biotransformación de formas inorgánicas amono y dimetilarsénico, y por su efecto acumulativo a través de las cadenas tróficas. Se conoce que la forma trivalente es la forma tóxica principal, alterando proteínas y enzimas, al nivel de aminoácidos con grupos sulfidrilos. Otras patologías asociadas al arsénico en el agua de consumo humano son bronquitis, cólicos intestinales, melanosis arsénica y keratosis arsénica. El hidroarsenismo es una enfermedad de tipo endémica (esta patología es también conocida como HACRE o hidroarsénicismo crónico regional endémico).
- *Plomo (Pb).* Se trata de un metal bioacumulable que produce desde anemias a dolores de cabeza, pasando por esterilidad, defectos en los fetos, ceguera, convulsiones e incluso la muerte. Una de las enfermedades asociada a este metal es el saturnismo. Uno de los objetivos de la Comisión europea es prohibir la presencia de este metal en la fabricación de aparatos electrónicos y juguetes, debido a que todas las formas plomo biodisponibles son tóxicas para los organismos vivos. Como buena noticia se calcula que en 1990, el 60% del plomo usado en EE UU procede de reciclado.
- *Cadmio (Cd).* Es un elemento que interfiere en el metabolismo de otros metales como el Zn y el Cu en el cuerpo humano. Afecta al sistema enzimático llegando a causar hipertensión y enfermedades cardiovasculares.
- *Níquel (Ni).* El compuesto NiCO es considerado como el causante de los cambios patógenos en los pulmones y vías respiratorias, llegando a causar cáncer de pulmón. Se encuentra en el humo del tabaco.
- *Cromo (Cr).* El cromo hexavalente es el más tóxico y la propiedad de ser soluble aumenta su peligro. Provoca dermatitis, irrita las mucosas, erosiona el esmalte dental, pérdida de peso, etc. Está considerado como un agente cancerígeno.

1.3.3. El EPER (Registro Inventario Europeo de Emisiones Contaminantes)

De acuerdo con la Directiva IPPC, y la Ley nacional y autonómica derivadas, las actividades incluidas en el Anexo I deben informar al denominado EPER, cuyo objetivo es disponer de información relativa a las emi-

siones a la atmósfera y a las aguas por las instalaciones industriales afectadas por la Normativa IPPC, según los requisitos de la Decisión 2000/479/CE, y siempre que se superen los umbrales de notificación establecidos en la misma.

Se han planteado un total de 63 contaminantes (37 en relación con la atmósfera y 26 en relación con las aguas) a controlar y notificar en caso de superación de los valores límites umbrales, tal como se presenta en la Tabla 1.2.

La intención del EPER es que la propia población, que podrá efectuar las consultas por cada sector industrial, por sustancia emitida y localización geográfica, pueda ejercer una cierta presión sobre las industrias más contaminantes para que implanten medidas de reducción y minimización de la contaminación con el objetivo de proteger el medio ambiente. Conviene destacar que el EPER sólo afecta a las siguientes actividades:

1. Industrias energéticas: instalaciones de combustión mayores de 50 MW, refinerías de petróleo y de gas, coquerías, instalaciones de gasificación y licuefacción de carbón.
2. Producción y transformación de metales: industria del metal e instalaciones de calcinación o sinterización de minerales metálicos, e instalaciones para la producción de metales ferrosos y no ferrosos.
3. Industrias de transformación de minerales: instalaciones de fabricación de cemento (>500 t/d), cal (>50 t/d), vidrio (>20 t/d), materiales minerales (>20 t/d) o productos cerámicos (>75 t/d), e instalaciones para la obtención de amianto y para la fabricación de productos a base de amianto.
4. Industria química: fabricación de productos químicos orgánicos de base, productos químicos inorgánicos de base y fertilizantes, biocidas y explosivos, y fármacos.
5. Gestión de residuos: instalaciones para la valorización o eliminación de residuos peligrosos (>10 t/d) o residuos municipales (>3 t/h), e instalaciones para la eliminación o aprovechamiento de los residuos no peligrosos (>50 t/d) y vertederos (>10 t/d).
6. Fabricación de pasta de papel a partir de madera o de otras materias fibrosas y de papel y cartón (>20 t/d).
7. Tratamiento previo de fibras o productos textiles (>10 t/d).
8. Curtido de cueros (>12 t/d).
9. Industrias agroalimentarias y explotaciones ganaderas: mataderos (>50 t/d), instalaciones para la producción de leche (>200 t/d), materias primas animales (>300 t/d), materias primas vegetales (>300 t/d), instalaciones para la eliminación o aprovechamiento de canales o desechos de animales (>10 t/d), e instalaciones destinadas a la cría de aves de corral (>40.000), cerdos (>2.000) o cerdas (>750).
10. Tratamiento de superficies de materiales, de objetos o productos con utilización de disolventes orgánicos (>200 t/a).
11. Fabricación de carbono o grafito.

Tabla 1.2. Identificación de contaminantes atmosféricos con arreglo al anexo A1 de la Decisión relativa al EPER

Contaminante/ Sustancia	Descripción e identificación
CH_4	Masa total de metano
CO	Masa total de monóxido de carbono
CO_2	Masa total de dióxido de carbono, de acuerdo con las directrices del IPPC utilizadas por el CMCC
HFC	Masa total de hidrofluocarburos (HFC)
N_2O	Masa total de óxido nitroso
NOx	Masa total de óxidos de nitrógeno, expresados como dióxido de nitrógeno
NH_3	Masa total de amoníaco
NMVOC	Masa total de compuestos orgánicos volátiles, salvo metano
PFC	Masa total de perfluocarburos (PFC)
SF_6	Masa total de hexafluoruro de azufre
SOx	Masa total de SO2 y SO3

1.3.4. Impactos atmosféricos y efectos colaterales: Protocolo de Kyoto

Se considera un impacto de tipo global cuando su efecto se extiende a grandes distancias, alejado del foco de emisión. El ejemplo más claro es el del efecto invernadero a causa de la emisión de CO_2, N_2O y CH_4. Este impacto global prevé una variación de la temperatura y de las precipitaciones y un aumento del nivel del mar, lo que deriva en diversas consecuencias negativas sobre los ecosistemas terrestres. Los impactos regionales y locales están localizados cerca de las fuentes de emisión, afectando indistintamente a aire, agua y suelos a causa de la presencia de sustancias contaminantes en estos tres medios. Entre estos impactos destaca la generación de resi-

duos, la contaminación de suelos, los impactos visuales y paisajísticos, o la generación de ruidos.

Los sistemas energéticos contribuyen rápidamente al agotamiento de los recursos, y al aumento de la entropía lo que significa degradar muchos ecosistemas. Si se dispone de un modelo energético en consonancia con los criterios de sostenibilidad, la degradación será más lenta ya que se potenciará el empleo de recursos renovables, lo que minimizará los impactos ambientales. La utilización de los recursos energéticos renovables sintoniza claramente con la definición de sostenibilidad, ya que implica el aprovechamiento de energías con una baja intensidad de impactos ambientales, a la vez que posibilita aumentar el ahorro y la eficiencia energética.

El efecto invernadero debe su nombre a que una parte de las radiaciones emitidas por la Tierra quedan retenidas de forma similar a como sucedería en un invernadero convencional, donde el cristal deja pasar la radiación solar pero retiene la radiación infrarroja que se emite desde el interior. En la atmósfera sucede lo mismo, en el sentido que entra más energía de la que sale. La atmósfera es prácticamente transparente a las radiaciones de onda corta, mientras que algunos de los gases presentes absorben la radiación de onda larga proveniente de la Tierra.

Del total de la radiación solar que llega a la Tierra (342 W/m^2), aproximadamente, como indica la Figura 1.5, una tercera parte se refleja al espacio, ya que el albedo de la Tierra, o su capacidad de reflejar energía, es de 0,3. El resto de la energía no reflejada (unos 240 W/m^2) es absorbida por la atmósfera, hidrosfera, litosfera o biosfera.

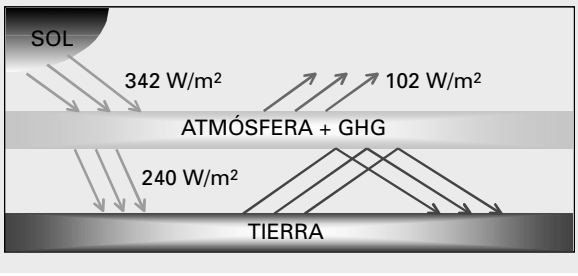


Figura 1.5. Cantidad de radiación solar que llega a la Tierra a través de la atmósfera.

La absorción de la radiación no es la misma en todas las zonas, ya que los componentes atmosféricos no absorben por igual. Por ejemplo, el oxígeno y el nitrógeno son transparentes a casi todas las radiaciones, mientras que el dióxido de carbono, el óxido nitroso, el vapor de agua o el metano son capaces de absorber radiaciones de ciertas longitudes de onda. Además, la contribución relativa de todos ellos es diferente. La Figura 1.6 muestra la contribución del CO_2, CH_4, N_2O y CFC's (clorofluorocarbonos) al efecto invernadero.

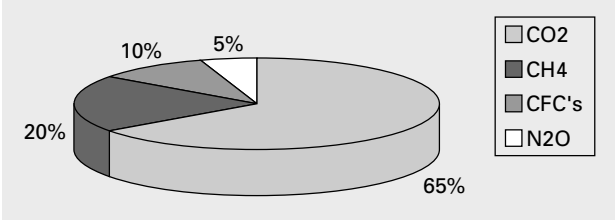


Figura 1.6. Contribución de los principales gases de efecto invernadero al cambio climático. (Fuente: IPCC).

Existen diversas actividades humanas que contribuyen al calentamiento global al emitir grandes cantidades de CO_2. Entre ellas cabe destacar el uso de energía eléctrica y térmica, y el transporte. En la Figura 1.7 se muestra la contribución porcentual de dichas actividades a la generación de dióxido de carbono. Por otro lado hay que ser conscientes que actividades que parecen tan normales, y ecológicas, como la agrícola y ganadera, genera en la UE el 10% de los gases de efecto invernadero. La fermentación entérica (intestinal), la gestión de los residuos ganaderos y las emisiones del suelo agrícola supusieron, respectivamente el 32%, el 20% y el 44% de las emisiones producidas por el sector.

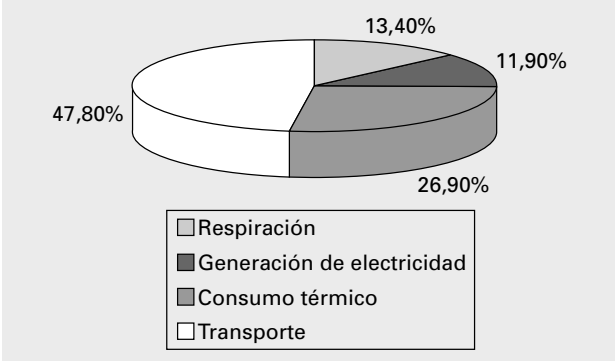


Figura 1.7. Contribución de las actividades antropogénicas a la generación de CO_2.

La generación antrópica media de cada persona es de unos 4 kg diarios de CO_2. En los países más ricos, se superan los 12 kg por persona y día, mientras que en los países en vías de desarrollo es apenas de 1 kg diario por persona.

1.4. INTRODUCCIÓN A LA CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS

En la Tierra habitan actualmente unos 6.000 millones de personas, de las cuales, cerca del 20% viven en 50 países que tienen graves insuficiencias de este vital líquido, consecuentemente este déficit es el factor limitante a su desarrollo económico y social. Además de los problemas de cantidad hay que añadir los referentes a su calidad, especialmente en los aspectos microbiológicos, todas estas deficiencias producen la muerte de unos tres millones de personas al año. Así mismo el creciente aumento de la demanda y consumo de agua se convertirá (se ha convertido ya) en un problema capaz de generar conflictos armados y que incidirá negativamente en el futuro de la biodiversidad de muchas zonas del planeta.

Se entiende por consumo doméstico de agua por habitante, al volumen de agua potable que dispone una persona para sus necesidades diarias de consumo, aseo, limpieza, etc., y se mide en litros por habitante y día (l/habitante-día). Es un valor muy representativo de las necesidades y/o demanda real de agua dentro de una comunidad o población y, por consiguiente, refleja también de manera indirecta su nivel de desarrollo económico y social. Este indicador se obtiene a partir del suministro medido por contadores, estudios locales, encuestas o la cantidad total suministrada a una comunidad dividida por el número de habitantes.

Desde comienzos del siglo XX, la población mundial se ha duplicado, mientras que, como resultado del desarrollo industrial y la extensión de la agricultura, la cantidad empleada de agua se ha sextuplicado. Teniendo en cuenta que en el mundo existe actualmente la misma cantidad de agua que hace 2.000 años y, que se ha incrementado simultáneamente la sobreexplotación, la contaminación y los efectos del cambio climático, actualmente, casi el 40% de los seres humanos cuentan con problemas de escasez de agua, circunstancia que, para el 2025 afectará a un 66% de la población mundial asentada básicamente en África y Asia Occidental.

1.4.1. Consumo de agua *per capita*

Se estima que actualmente se consume al año el 54% del agua dulce disponible y, según la UNESCO, a mediados del siglo XXI la población mundial alcanzará los 12.000 millones de habitantes previstos, la demanda se habrá duplicado y las reservas hídricas de nuestro planeta llegarán a su límite.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) considera que la cantidad adecuada de agua para el consumo humano (beber, cocinar, higiene personal y limpieza del hogar) es de 50 l/hab-día. A estas cantidades debe sumarse el aporte necesario para la agricultura, la industria y, por supuesto, la conservación de los ecosistemas acuáticos, fluviales y, en general, dependientes del agua dulce. Teniendo en cuenta estos parámetros, se considera una cantidad mínima de 100 l/hab-día. (En España, y según valores de 2005, el consumo medio se sitúa en 171 litros por habitante y día).

El destino aplicado al agua dulce consumida varía mucho de una región a otra del planeta, incluso dentro de un mismo país. Por regla general, el consumo elevado de agua potable se da en países ricos y, dentro de estos, los consumos urbanos duplican a los consumos rurales. Mundialmente se extraen en la actualidad unos 3.600 km^3 de agua dulce para la actividad humana, es decir, 1.600 litros/hab-día, de los cuales, aproximadamente la mitad no se consume (se evapora, infiltra al suelo o vuelve a algún cauce) y, de la otra mitad, para el mundo más industrializado, se calcula que el 65% se destina a la agricultura, el 25% a la industria y, tan sólo el 10% a consumo doméstico (En el mundo el reparto es 73% agricultura, 21% industria y 6% consumo doméstico). En la Tabla 1.3 se muestra una aproximación de este reparto en función de la renta *per cápita*.

Tabla 1.3. Consumos medios de agua *per cápita*.

Ámbito	Renta alta	Renta baja	Media mundial	España
Agricultura	40	80	65	62
Industria	45	10	25	25
Urbano	15	10	10	12

Para determinar la disponibilidad de agua en un país o área geográfica determinada, se maneja el «umbral de presión hídrica» (1.700 m^3/hab-año), por debajo del cual aparecen frecuentemente las sequías y el «umbral de penuria» (1.000 m^3/hab-año) valores inferiores suponen problemas de abastecimiento a la agricultura e industria. Actualmente, se estima que 2.300 millones de personas están sometidas a presión hídrica y 1.700 millones sufren penuria, y se prevé alcanzar respectivamente los 3.500 y 2.400 millones de personas en el año 2025.

Por otro lado y, debido a la contaminación ambiental (aguas residuales, emisiones a la atmósfera, residuos sólidos, etc.), una fracción importante del

agua dulce disponible sufre algún tipo de contaminación. Las fuentes naturales de agua cuentan con procesos de autodepuración, pero cuando se emplea en exceso o es escasa, en general empeora su calidad. Según la OMS, más de 1.200 millones de personas consumen agua sin garantías sanitarias, lo que provoca entre 20.000 y 30.000 muertes diarias y gran cantidad de enfermedades. Los ratios de consumo por habitante difieren enormemente entre distintas zonas del planeta, dependiendo principalmente de la disponibilidad del agua y del nivel de desarrollo del país. En la Tabla 1.4 se aprecia el consumo en diferentes zonas del planeta (datos 1996).

Tabla 1.4. Consumos medios de agua por zonas

Área geográfica	Consumo	
	m^3/hab.-año	l/hab.-día
América del Norte y Central	1.874	5.134
Europa	1.290	3.534
Oceanía	887	2.430
Asia	529	1.449
América del Sur	485	1.329
África	250	685
Media mundial	657	1.800
España	1.201	3.290

En conclusión, se puede establecer que, a pesar de que la cantidad de agua disponible en el planeta teóricamente es suficiente para cubrir las necesidades de la población, su irregular distribución en el espacio y en el tiempo, irregularidad que también se halla en la distribución de demanda, unida a su consumo excesivo e incorrecto en muchos países, podría provocar un grave empeoramiento en la disponibilidad de este recurso dentro de pocos años. Ante esta situación es necesario un cambio del actual modelo, para pasar al establecido en la denominada «nueva cultura del agua», basado en el ahorro de agua, la optimización de su gestión, el respeto y sensibilización hacia este recurso, su reparto equitativo y la valoración como activo ecológico y social.

1.4.2. El ciclo del agua

Al igual que se ha expuesto con la contaminación atmosférica, en el presente apartado, se intenta sentar las bases de la contaminación o polución de las aguas y las consecuencias que ello conlleva sobre el medio ambiente. La incidencia de la contaminación en las aguas aparece de manera más directa y suelen ser más graves que las provocadas en el medio atmosférico.

A titulo de introducción habría que distinguir entre:

- *Aguas residuales*. O aguas con cierta cantidad de polución. Su concentración en los parámetros convencionales como: Sólidos en suspensión, DQO, DBO_5, etc., se halla en rangos en los que después de un tratamiento convencional pueden ser vertidas a cauce público.
- *Residuos líquidos*. Aunque técnicamente se trata de aguas, uno o varios contaminantes contenidos supera de tal manera los límites permitidos que imposibilita su tratamiento, por ello se prohíbe su vertido al medio natural (normalmente un río) y debe ser gestionado por una empresa especializada.

Las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR) además de cumplir con su objetivo básico de obtener un agua de calidad idónea para su vertido, actúan en la práctica como grandes fábricas de fangos residuales, los cuales corresponden a la polución separada por dicha EDAR. En los tratados sobre depuración de aguas contaminadas, se suele distinguir entre:

- *Aguas residuales urbanas*. Desde el punto de vista de los residuos y el reciclaje, el gran reto es la gestión de los grandes volúmenes de estos fangos.
- *Aguas residuales industriales*. A diferencia de las anteriores y debido a su origen la cantidad y calidad son muy variables y con frecuencia causa disfunciones en las EDAR donde finalmente inciden. En este apartado también deben incluirse las aguas procedentes de explotaciones mineras. La gestión de estos lodos residuales suele ser compleja, especialmente, cuando contienen metales u otros contaminantes de riesgo.
- Las *aguas y lixiviados de residuos sólidos* de la ganadería estabulada se suelen aplicar como abono en la agricultura. Su gestión deficiente (por sobredosificación) provoca grandes problemas en muchas zonas de Europa, al contaminarse con nitratos sus aguas subterráneas. Existe una directiva de la UE para afrontar este problema.

La Figura 1.8 muestra de manera comparada el desarrollo del ciclo de evacuación del agua en el medio rural (izquierda) y en el espacio urbano (derecha). Al margen de la cantidad de agua reevaporada, que tiene indudables repercusiones en el microclima, desde el punto de vista medioambiental el factor más diferenciador es la cantidad de escorrentía canalizada.

Tanto en las zonas urbanas, como en las áreas in-

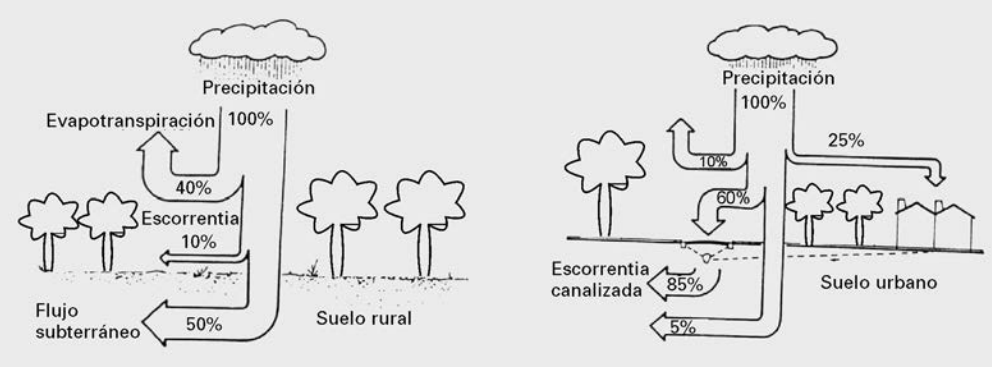


Figura 1.8. El ciclo del agua.

dustriales es preciso depurar las aguas antes de su vertido. Ello supone una generación ingente de fangos como consecuencia de las actividades de tratamiento de aguas. Existe un paralelismo entre los lodos y los catalizadores y filtros colmatados de las depuraciones de humos y gases, y es que, paradójicamente cuando más se depura más residuos se generan. En el bien entendido de que con las depuraciones los residuos se hallan controlados y los medios portadores: agua y aire, limpios.

Finalmente es preciso hacer una mención a la Directiva Marco del Agua puesto que, hoy en día además de la depuración hay que poner atención en otros aspectos como las especies invasoras, de flora y fauna, que tanto daño suelen hacer a los ecosistemas y, en general a la calidad ecológica de las aguas, incluyendo las riberas de los ríos.

1.4.3. La depuración de las aguas residuales

Las aguas residuales urbanas se hallan dentro de unos parámetros de calidad sobradamente conocidos, en cambio las aguas residuales industriales tienen unos rangos de calidad extremadamente variable e inestable. No obstante debe tenerse en cuenta que alrededor del 80-90% de los vertidos industriales se realizan en redes de alcantarillado públicas, las cuales casi siempre disponen de la correspondiente EDAR. Esta circunstancia favorece extraordinariamente la gestión de estas aguas residuales, puesto que no es necesario alcanzar los exigentes límites de calidad establecidos para los vertidos directos al medio hídrico (río, lago, mar).

Resultaría un trabajo ímprobo, y fuera del espíritu de este libro, hacer una descripción de los infinitos sistemas de depuración de aguas residuales. Sin embargo, y en aras a una mejor comprensión del resultado final de estos procesos: los fangos, se juzga necesario definir los principales procesos:

Pretratamientos: Suelen consistir en la eliminación de sólidos gruesos, arenas y materias flotantes o espumas de fácil separación, o bien homogeneizar los diversos efluentes que llegan a las EDAR's.

El desbaste es la operación previa y sirve para retirar las materias sólidas de mayor volumen (maderas, latas, piedras, plásticos, etc.). A continuación le sigue el desarenado, donde se separa la arena, hasta un tamaño de 200 μm, arrastrada del agua. (En las aguas industriales no se suele realizar el desarenado).

A su vez la separación del aceite y las grasas se realiza por flotación en el mismo recinto del desarenado. En algunos casos, se lleva a cabo una corrección del pH del agua, adicionando un ácido o una base.

Tratamientos primarios: Su objetivo es la separación de las partículas sólidas bien por gravedad o eventualmente por flotación inducida.

En primera instancia una decantación provoca la sedimentación, por gravedad, de las partículas de tamaño superior a 1 μm, la acumulación de estas partículas son las que producen los fangos residuales. Esta sedimentación puede ser simplemente física o fisicoquímica, es decir adicionando reactivos químicos (coagulantes y/o floculantes) que faciliten la decantación, con ello se consigue un agua más clarificada.

Con la adición de coagulantes (sulfato de aluminio, sulfato ferroso, cloruro férrico, etc.) se consiguen vencer las fuerzas eléctricas de repulsión que mantienen los coloides en suspensión estable y los fuerzan a crear aglomerados denominados coágulos. Más tarde la adición de floculantes (polielectrólitos aniónicos o catiónicos) agrupan los coágulos para que puedan ser separados más fácilmente.

En aquellas industrias en los que la polución se halla en forma insoluble, los procesos primarios son suficientes para adecuar su vertido. En algunas industrias el tratamiento primario se suele hacer por flotación (papeleras).

Tratamientos secundarios: En estos tratamientos, denominados biológicos, las bacterias y otros microorganismos metabolizan y biodegradan las materias orgánicas solubles o coloidales no separadas anteriormente en el tratamiento primario. Se dividen en aerobios y anaerobios.

Los tratamientos aerobios, de los que existe una variada tecnología, son los más habituales (90%) y se basan en la asimilación de la materia orgánica por microorganismos en presencia de oxígeno. Tienen rendimientos de depuración muy elevados (90% en S.S., DQO, DBO_5) obteniéndose generalmente aguas depuradas de calidad idónea para su vertido. El producto residual final son los fangos activados, estos son el resultado de provocar el desarrollo de un cultivo microbiano en forma de flóculo o fango activado en un tanque aireado que se alimenta del agua procedente de un tratamiento primario.

Los tratamientos anaerobios tienen su ámbito principal de aplicación cuando la carga orgánica contaminante es muy elevada, como ocurre en algunas industrias alimentarias. La gestión de este tipo de tratamiento es un tanto rígida por lo debe diseñarse cuidadosamente. La ventaja de esta solución es que transforma buena parte de la carga contaminante en biogás que puede aprovecharse para fines energéticos.

Tratamientos terciarios: Normalmente, se aplican a efluentes procedentes de un tratamiento secundario, cuando las aguas residuales precisan una mejor calidad, como puede ser una menor concentración de amonio y/o fósforo (nutrientes).

La Tabla 1.5 orienta sobre la efectividad el proceso de tratamiento en relación con la naturaleza del contaminante.

Tabla 1.5. Sistemas de tratamiento de aguas

Contaminantes	Tratamiento primario	Fangos activados	Nitrificación	Desnitrificación	Filtro percolador	PCBs	Coagulación/Floculac./sedim.	Filtración tras proc. Fangos act.	Adsorción sobre carbón activado	*Stripping* de amoniaco	Intercambio iónico selectivo	Cloración a *Breakpoint*	Osmosis inversa	Riego superficial	Riego	Infiltración percolación	Cloración	Ozono
DBO	■	◆	◆	●	◆	◆	◆	■	◆		■		◆	◆	◆	◆		●
DQO	■	◆	◆	●	◆		◆	■	■	●	■		◆	◆	◆	◆		◆
SST	◆	◆	◆	●	◆	◆	◆	◆	◆		◆		◆	◆	◆	◆		
NH_3N	●	◆	◆	■		◆	●	■	■	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆		
NO_3N				◆				■	●					■				
Fósforo	●	■	◆	◆			◆	◆	◆				◆	◆	◆	◆		
Alcalinidad		■					■	◆								■		
Grasas y aceites	◆	◆	◆				■		■					◆	◆	◆		
Coliformes totales		◆	◆		●		◆		◆			◆		◆	◆	◆	◆	◆
SDT													◆					
Arsénico	■	■	■				■	◆	●									
Bario		■	●				■	●										
Cadmio	■	◆	◆		●	■	◆	■	●							●		
Cromo	■	◆	◆		●	◆	◆	■	■									
Cobre	■	◆	◆		◆	◆	◆	●	■							◆		
Flúor							■		●							■		
Hierro	■	◆	◆		■	◆	◆	◆	◆									
Plomo	◆	◆	◆		■	◆	◆	●	■									
Manganeso	●	■	■		●		■	◆	■				◆					
Mercurio	●	●	●		●	◆	●	■										
Selenio	●							◆	●									
Plata	◆	◆	◆		■		◆		■									
Zinc	■	■	◆		◆	◆	◆		◆							◆		
Color	●	■	■		●		◆	■	◆				◆	◆	◆	◆		◆
Agentes espumantes	■	◆	◆		◆		■		◆				◆	◆	◆	◆		●
Turbidez	■	◆	◆	●	■		◆	◆	◆				◆	◆	◆	◆		
COT	■	◆	◆	●	■		◆	■	◆	●			◆	◆	◆	◆		◆

● = eliminación del 25% de la concentración del afluente; ■ = 25-50%; ◆ = 50%.
Los espacios en blanco indican que no se disponen de datos, que los resultados no permiten extraer conclusiones o que se produce un aumento de la contaminación.

1.4.4. Tratamiento de fangos de EDAR

Tratamientos de fangos: Los fangos son el resultado último de la depuración de las aguas ya sea del proceso primario como secundario. El tratamiento general de los fangos se divide en:

- Espesamiento, que es la operación que tiene lugar en los decantadores-espesadores. A la salida el fango tiene un contenido en sólidos de entre un 3% y un 8%.
- La operación siguiente es la deshidratación y su objetivo es aumentar el contenido en sólidos hasta un valor medio del 25%. Suele llevarse a cabo por medios mecánicos como filtros banda, filtros-prensa, centrífugas, etc.
- La estabilización es una operación que se realiza para eliminar la posible actividad bioquímica remanente en el fango. El método más usual consiste en la adición de cal.

Según datos proporcionados por la ACA (*Agència Catalana de l'Aigua*), la generación de fangos de EDAR prevista en Cataluña para el año 2005 será de 150.000 t(MS). El destino esperado de los fangos para el año 2005 se representa en la Figura 1.9.

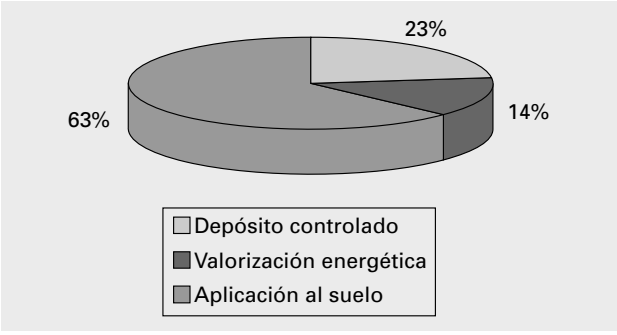


Figura 1.9. Destino previsto de los fangos de EDAR en Cataluña en el año 2005.

Siguiendo las indicaciones de las directivas europeas y del Plan Nacional de Lodos, los fangos depositados en vertederos controlados han de disminuir en un 20% a partir de 2007.

En la Figura 1.9, y siguiendo con la problemática constreñida al territorio catalán, el término «aplicación al suelo» es la partida más importante y vale la pena dedicarle unos comentarios, ya que la definición hace referencia a:

- Agricultura extensiva. La aplicación directa de los fangos se halla cada vez más restringida al ser desplazados en su uso por los crecientes residuos ganaderos generados por el aumento de la cabaña estabulada y, también, por los problemas de contaminación por nitratos de las aguas subterráneas.
- Agricultura intensiva y jardinería. Normalmente se aplica en forma de compost, por lo que se trata de cantidades limitadas.
- Restauración de suelos. Esta actividad no afecta demasiado a la calidad de los fangos, aunque sí depende de la propia dinámica de la restauración, ya que la fracción orgánica del fango puede generar inestabilidad mecánica. Deben tenerse en cuenta los efectos de los lixiviados a largo plazo.
- Obra pública. En este caso es necesario un estudio detallado para cada aplicación.
- Canteras. Como en el caso de la restauración de suelos, se trata de una actividad que puede afectar a la calidad del entorno y es muy dependiente de la naturaleza del fango.

En la UE, la vía en el tratamiento de fangos de EDAR muestra claramente la tendencia al incremento de la valorización energética en detrimento de la opción mayoritaria, la aplicación al suelo.

A su vez la Directiva 1999/31/CE, relativa al vertido de materia orgánica en depósitos controlados, tendrá un fuerte impacto en relación a la futura gestión de fangos. Según el artículo 5 de la citada Directiva, los Estados miembros han de elaborar una estrategia nacional que les permita establecer la reducción de los residuos biodegradables en tres fases: reducción del 25%, 50% y 75%, respecto a la producción de 1990 hasta 2016 como último término.

En el artículo 2, apartado m, de la citada Directiva se definen los «residuos biodegradables» como todos aquellos residuos que puedan descomponerse de forma aerobia y anaerobia, tales como residuos de alimentos y de jardín, y, en menor medida el papel y el cartón. Esta definición es muy importante de cara a las futuras emisiones de los gases de efecto invernadero relacionados con el Protocolo de Kyoto.

Como consecuencia de esta Directiva, la gestión de fangos de EDAR en depósitos controlados, está muy limitada desde 2005 en Alemania y desde el año 2004 prohibido en Austria; en Suiza no se autoriza el vertido desde el año 2000, mientras que en Francia tampoco existe, en la práctica, esta vía de gestión.

De todo lo expuesto se deduce que en los próximos años la valorización energética de los fangos de EDAR aumentará significativamente, debido a la pre-

sión de los residuos ganaderos, los problemas con los nitratos en las aguas subterráneas y la próxima prohibición de su destino a depósitos controlados.

1.4.5. La reutilización del agua residual

Aunque España no sea uno de los países más consumidores de agua, según muestra el gráfico de la Figura 1.10; sin embargo, las peculiaridades de nuestro país unido a su importante desarrollo económico y a su baja pluviometría, debería hacer reflexionar y reducir, si cabe el consumo.

La reutilización de las aguas, en particular las procedentes del terciario de depuradas urbanas, representa una aplicación que se irá imponiendo debido al incremento del consumo por una parte y al progresivo agotamiento de las fuentes de abastecimiento por otra.

En los países industrializados el reparto, por sectores, en el consumo del agua es, con pocas variaciones, el siguiente:

- Consumo para usos agrícolas 45-70%
- Consumo para usos industriales 15-20%
- Servicios municipales 8-15%

En zonas áridas o semiáridas la carencia de agua obliga a investigar opciones de reutilización. La experiencia relativamente limitada, por ejemplo sobre compuestos mutagénicos y virus y bacterias resistentes que pueden permanecer en el agua que ha pasado una vez el ciclo humano (agua depurada), impide una amplia reutilización.

La reutilización del agua es una opción sanitariamente complicada pero necesaria en la mayoría de los países. La elección de su reutilización debe hacerse conjuntamente con la selección de los procesos de tratamiento del agua residual. En la mayoría de los casos el agua residual después de ser sometida a un tratamiento en una EDAR biológica convencional, se procede a un tratamiento terciario. Esta agua regenerada, en función del nivel de depuración, puede ser nuevamente aplicada para:

- Agricultura.
- Campos de golf.
- Riego de parques, jardines, cisternas para la extinción de incendios.
- Actividades recreativas: parques temáticos, lagos, cursos de agua.
- Balsas de recarga de acuíferos o su infiltración directa en el subsuelo para este mismo fin o como barreras a la intrusión salina.
- Actividades industriales: procesos industriales como refrigeración, limpieza.

Los ámbitos geográficos donde se produce un mayor consumo de agua regenerada son por este orden: Islas Canarias, Islas Baleares, litoral Mediterráneo peninsular y Vitoria (País Vasco). Existe un vacío legal respecto a la normativa aplicable a las aguas para riego agrícola, otro problema es el coste del agua regenerada que sólo puede venderse cuando no existe otra alternativa o porque reglamentariamente debe consumirse ésta, como sucede con los campos de golf. A pesar de estas dificultades al uso del agua regenerada en muchos países la tasa de reutilización supera ya el 15% del consumo.

1.4.6. Problemática ambiental asociada a la desalación

España era (año 2006), la «cuarta potencia» mundial en agua desalada, por detrás de Arabia Saudita, Emiratos Árabes y EE UU con más de 900 plantas de desaladoras, también denominadas desalinizadoras, y 1,6 hm^3/día. Desde el punto de vista ambiental los

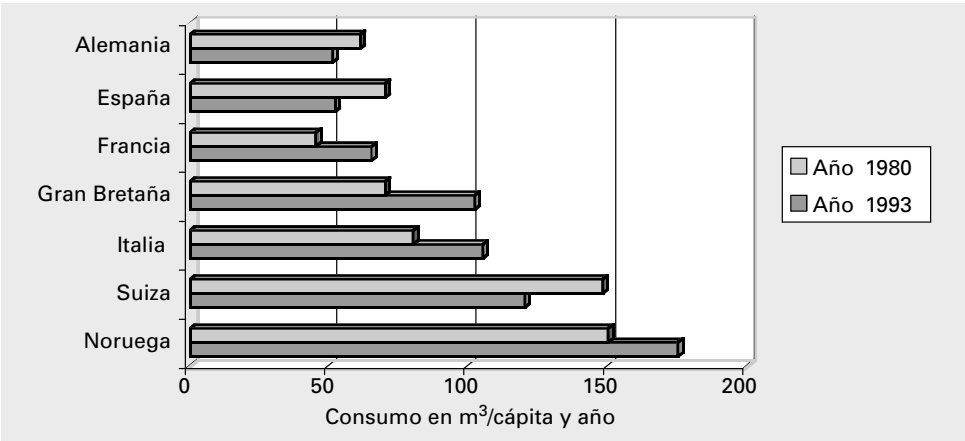


Figura 1.10. Reutilización de agua.

problemas que plantea la desalación de agua de mar son:

- *El consumo energético*. Es preciso aplicar una presión importante al agua contra las membranas para vencer la presión osmótica. Si bien la tecnología de fabricación de las membranas y los sistemas de recuperación de energía han sufrido un vertiginoso desarrollo en los últimos años, se esta tocando el límite físico. Los consumos actuales de 2,8 kW · h/m^3 son muy aceptables (La energía mínima teórica correspondiente a la presión requerida en las membranas para tratar agua de mar, 35 g de sal/l, es de 0,976 kW · h/m^3. No obstante el problema intrínseco asociado: el consumo energético seguirá marcando un fuerte impacto a no ser que se emplee energía de menor precio (renovable).
- *El vertido*. Tratándose de agua marina, la desalación proporciona del orden de 0,5 m^3 de agua dulce por m^3 de agua de mar. Esto significa que hay que devolver al mar la mitad del agua captada con el doble de salinidad (salmuera). Para evitar su impacto puede diluirse con agua residual depurada. Las praderas de algas posidonea son las más sensibles a las aguas hipersalinas obstáculo fácilmente salvable cuando se construye el emisario submarino que es la solución constructiva más habitual. No se han detectado otras incidencias biológicas. Cuando la desalación se realiza tierra a dentro, el vertido es mucho más complicado, una solución es la construcción de salmueroductos hasta el mar o sistemas de evaporación avanzados.

Con todo, el coste global de desalación se ha reducido a finales del 2005 a 0,65-0,4 €/m^3, siendo el coste energético un componente decisivo en el cálculo de la tarifa del agua.

En el DVD adjunto, en el punto 1, correspondiente al Capítulo 1, se muestran instalaciones y datos relativos a la desalación, facilitados por el Ministerio de Medio Ambiente (España).

1.5. DEFINICIONES SOBRE RESIDUOS

Residuo es aquella sustancia u objeto generado por una actividad productiva o de consumo, de la que hay que desprenderse por no ser objeto de interés directo de la actividad principal.

En general, todas las legislaciones suelen definir el residuo de una manera similar: como aquella sustancia u objeto que no resulta útil para su poseedor y por la cual tenga la intención, o bien la obligación de desprenderse de ella.

Así pues, no es de extrañar que cualquier tipo de actividad genere una gran cantidad de residuos. A ello han contribuido históricamente dos factores:

- El consumo y la obsolescencia.
- El precio muy bajo de los vertederos.

El segundo factor entra de lleno en la vertiente ambiental. Así, las diversas autoridades ambientales han dictado normas para reducir el efecto de los vertederos a base de prohibir la apertura de nuevas instalaciones, aplicar un precio alto de vertido, establecer cánones o disposiciones que invaliden el vertido. La última ha sido la Directiva 1999/31/CE, relativa al vertido de materia orgánica en depósitos controlados, que tiene y tendrá un fuerte impacto en relación a la futura gestión de las fracciones orgánicas. Según el artículo 5 de la citada Directiva, los Estados miembros han de elaborar una estrategia nacional que les permita establecer la reducción de los residuos biodegradables en tres fases: reducción del 25%, 50% y 75%, respecto a la producción de 1990 hasta 2016 como último término.

La presente obra se focalizará en el ámbito de los denominados residuos industriales, aunque se efectuarán incursiones a otros tipos como los domiciliarios, los fangos de EDAR y los procedentes de las actividades mineras.

1.5.1. La Ley de Residuos 10/98

Seguidamente se reproducen los Artículos 2 y 3 de la Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos, norma que transpone al ordenamiento jurídico español la Directiva 75/442/CEE del Consejo, de 15 de julio de 1975, modificada por la Directiva 91/156/CEE, del Consejo, de 18 de marzo de 1991, referente a la gestión de los residuos.

Artículo 2. Ámbito de aplicación.

1. Esta Ley es de aplicación a todo tipo de residuos, con las siguientes exclusiones:

a) Las emisiones a la atmósfera reguladas en la Ley 38/1972, de 22 de diciembre, de Protección del Ambiente Atmosférico.

b) Los residuos radiactivos regulados por la Ley 25/1964, de 29 de abril, de Energía Nuclear.

c) Los vertidos de efluentes líquidos a las aguas continentales regulados por la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas; los vertidos desde tierra al mar regulados por la Ley 22/1988 de Costas, de 28 de julio, y los vertidos desde buques y aeronaves al mar regulados por los tratados internacionales de los que España sea parte.

Artículo 3. Definiciones.

A los efectos de la presente Ley se entenderá por:

a) *Residuo:* cualquier sustancia u objeto perteneciente a alguna de las categorías que figuran en el anejo de esta Ley, del cual su poseedor se desprenda o del que tenga la intención u obligación de desprenderse. En todo caso, tendrán esta consideración los que figuren en el Catálogo Europeo de Residuos (CER), aprobado por las Instituciones Comunitarias.

b) *Residuos urbanos o municipales:* los generados en los domicilios particulares, comercios, oficinas y servicios, así como todos aquellos que no tengan la calificación de peligrosos y que por su naturaleza o composición puedan asimilarse a los producidos en los anteriores lugares o actividades.

Tendrán también la consideración de residuos urbanos los siguientes:

- Residuos procedentes de la limpieza de vías públicas, zonas verdes, áreas recreativas y playas.
- Animales domésticos muertos, así como muebles, enseres y vehículos abandonados.
- Residuos y escombros procedentes de obras menores de construcción y reparación domiciliaria.

c) *Residuos peligrosos:* aquellos que figuren en la lista de residuos peligrosos, aprobada en el Real Decreto 952/1997, así como los recipientes y envases que los hayan contenido. Los que hayan sido calificados como peligrosos por la normativa comunitaria y los que pueda aprobar el Gobierno de conformidad con lo establecido en la normativa europea o en convenios internacionales de los que España sea parte.

d) *Prevención:* el conjunto de medidas destinadas a evitar la generación de residuos o a conseguir su reducción, o la de la cantidad de sustancias peligrosas o contaminantes presentes en ellos.

e) *Productor:* cualquier persona física o jurídica cuya actividad, excluida la derivada del consumo doméstico, produzca residuos o que efectúe operaciones de tratamiento previo, de mezcla, o de otro tipo que ocasionen un cambio de naturaleza o de composición de esos residuos. Tendrá también carácter de productor el importador de residuos o adquirente en cualquier Estado miembro de la Unión Europea.

f) *Poseedor:* el productor de los residuos o la persona física o jurídica que los tenga en su poder y que no tenga la condición de gestor de residuos.

g) *Gestor:* la persona o entidad, pública o privada, que realice cualquiera de las operaciones que componen la gestión de los residuos, sea o no el productor de los mismos.

h) *Gestión:* la recogida, el almacenamiento, el transporte, la valorización y la eliminación de los residuos, incluida la vigilancia de estas actividades, así como la vigilancia de los lugares de depósito o vertido después de su cierre.

i) *Reutilización:* el empleo de un producto usado para el mismo fin para el que fue diseñado originariamente.

j) *Reciclado:* la transformación de los residuos, dentro de un proceso de producción, para su fin inicial o para otros fines, incluido el compostaje y la biometanización, pero no la incineración con recuperación de energía.

k) *Valorización:* todo procedimiento que permita el aprovechamiento de los recursos contenidos en los residuos sin poner en peligro la salud humana y sin utilizar métodos que puedan causar perjuicios al medio ambiente. En todo caso, estarán incluidos en este concepto los procedimientos enumerados en el anexo II.B de la Decisión de la Comisión (96/350/CE) de 24 de mayo de 1996, así como los que figuren en una lista que, en su caso, apruebe el Gobierno.

l) *Eliminación:* todo procedimiento dirigido, bien al vertido de los residuos o bien a su destrucción, total o parcial, realizado sin poner en peligro la salud humana y sin utilizar métodos que puedan causar perjuicios al medio ambiente. En todo caso, estarán incluidos en este concepto los procedimientos enumerados en el anexo IIA de la Decisión de la Comisión (96/350/CE) de 24 de mayo de 1996, así como los que figuren en una lista que, en su caso, apruebe el Gobierno.

ll) *Recogida:* toda operación consistente en recoger, clasificar, agrupar o preparar residuos para su transporte.

m) *Recogida selectiva:* el sistema de recogida diferenciada de materiales orgánicos fermentables y de materiales reciclables, así como cualquier otro sistema de recogida diferenciada que permita la se-

paración de los materiales valorizables contenidos en los residuos.

n) *Almacenamiento:* el depósito temporal de residuos, con carácter previo a su valorización o eliminación, por tiempo inferior a dos años o a seis meses si se trata de residuos peligrosos, a menos que reglamentariamente se establezcan plazos inferiores.

No se incluye en este concepto el depósito temporal de residuos en las instalaciones de producción con los mismos fines y por períodos de tiempo inferiores a los señalados en el párrafo anterior.

ñ) *Estación de transferencia:* instalación en la cual se descargan y almacenan los residuos para poder posteriormente transportarlos a otro lugar para su valorización o eliminación, con o sin agrupamiento previo.

o) *Vertedero:* instalación de eliminación que se destine al depósito de residuos en la superficie o bajo tierra.

p) *Suelo contaminado:* todo aquel cuyas características físicas, químicas o biológicas han sido alteradas negativamente por la presencia de componentes de carácter peligroso de origen humano, en concentración tal que comporte un riesgo para la salud humana o el medio ambiente, de acuerdo con los criterios y estándares que se determinen por el Gobierno.

Se excluyen del ámbito de aplicación de la Ley, las siguientes tipologías de residuos:

- Las emisiones a la atmósfera reguladas en la Ley 38/1972, de 22 de diciembre, de Protección del Ambiente Atmosférico.
- Los residuos radiactivos regulados por la Ley 25/1964, de 29 de abril, de Energía Nuclear.
- Los vertidos de efluentes líquidos a las aguas continentales regulados por la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas; los vertidos desde tierra al mar regulados por la Ley 22/1988, de 28 de julio, de Costas, y los vertidos desde buques y aeronaves al mar regulados por los tratados internacionales de los que España sea parte.

La presente Ley será de aplicación supletoria a las materias que se enuncian a continuación en aquellos aspectos regulados expresamente en su normativa específica:

- La gestión de los residuos resultantes de la prospección, extracción, valorización, eliminación y almacenamiento de recursos minerales, así como de la explotación de canteras, en lo regulado en la Ley 22/1973, de 21 de julio, de Minas.
- La eliminación y transformación de animales muertos y desperdicios de origen animal, en lo regulado en el Real Decreto 2224/1993, de 17 de diciembre, sobre normas sanitarias de eliminación y transformación de animales muertos y desperdicios de origen animal y protección frente a agentes patógenos en piensos de origen animal.
- Los residuos producidos en las explotaciones agrícolas y ganaderas consistentes en materias fecales y otras sustancias naturales y no peligrosas, cuando se utilicen en el marco de las explotaciones agrarias, en lo regulado en el Real Decreto 261/1996, de 16 de febrero, sobre protección de las aguas contra la contaminación producida por los nitratos procedentes de fuentes agrarias y en la normativa que apruebe el Gobierno en virtud de lo establecido en la disposición adicional quinta.
- Los explosivos, cartuchería y artificios pirotécnicos desclasificados, así como residuos de materias primas peligrosas o de productos explosivos utilizados en la fabricación de los anteriores, en lo regulado en el Reglamento de Explosivos, aprobado mediante Real Decreto 230/1998, de 16 de febrero.
- Las tierras separadas en las industrias agroalimentarias en sus fases de recepción y de limpieza primaria de las materias primas agrícolas, cuando estén destinadas a su valoración como tratamiento de los suelos, produciendo un beneficio a la agricultura o una mejora ecológica de los mismos, de acuerdo con el apartado R.10, del anexo II.B de la Decisión de la Comisión de 24 de mayo de 1996.

1.5.2. La generación de residuos

Existe una clara correlación entre la renta per cápita disponible de los ciudadanos de un país y la generación de residuos. Como muestra la Figura 1.11 no existe ninguna duda que, en la medida en que el país es «más rico» su producción de residuos aumenta.

Por lo que hace referencia a los RSU (residuos sólidos urbanos), quizás los residuos con los que se está más familiarizado por producirse en nuestro entorno directo, la tendencia en su generación también es claramente alcista. Así en Cataluña la generación

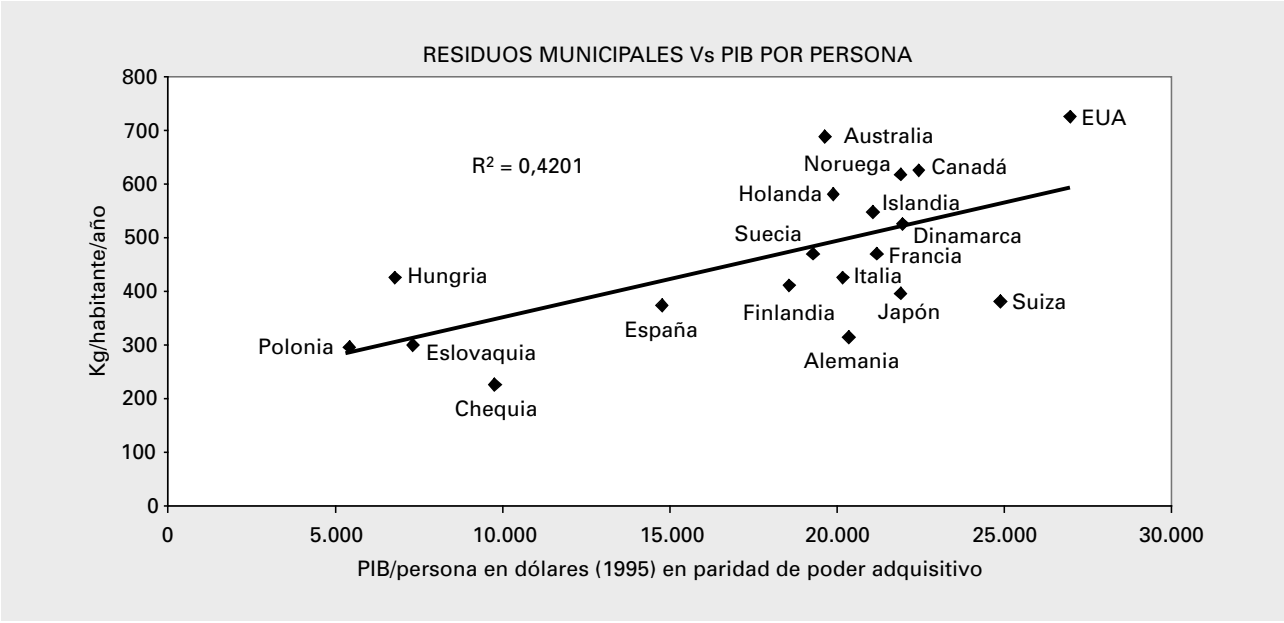


Figura 1.11. PIB por persona y generación de residuos industriales.

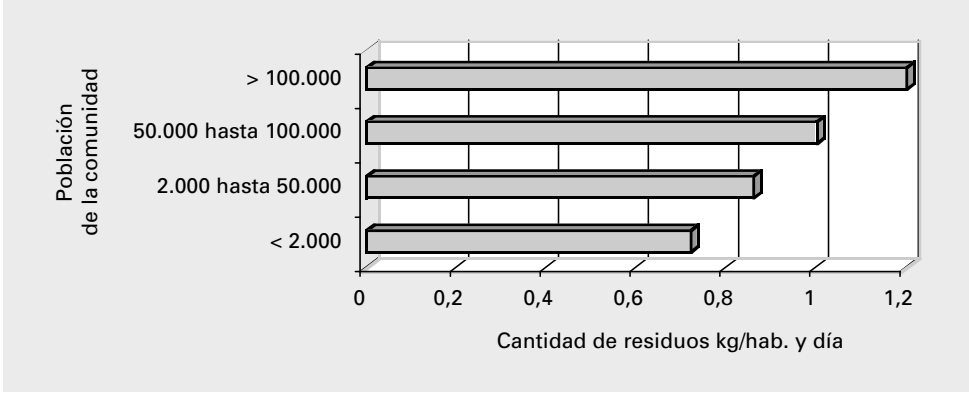


Figura 1.12. Correlación entre la producción de RSU y la población de la comunidad.

per capita se ha duplicado en poco más de diez años. Análogamente al caso anterior, también se observa una correlación directa, entre la producción de RSU y el tamaño/distribución de población de la comunidad. Como indica la Figura 1.12, el habitante de gran ciudad genera más residuos.

En el campo de la generación de residuos es importante resaltar lo que acontece con los RSU y los RTP's (residuos tóxicos y peligrosos). La Figura 1.13 establece la estadística de la generación de residuos urbanos en los países de la UE más Japón y América del Norte.

Exceptuando Canadá y EE UU es curioso observar que la tasa de generación en todos los países es muy similar y ello se debe a la armonización de las costumbres.

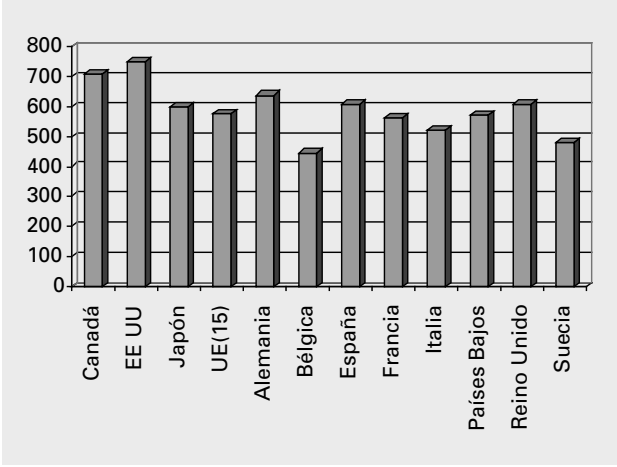


Figura 1.13. Producción de RSU (kg/hab y año) en 2003. Fuente Eurostat.

Sin embargo, circunstancia muy diferente sucede, como pone de manifiesto la Figura 1.14 con los RTP's. Ello responde más a la clasificación y definición de los residuos, por lo que hace referencia al nivel de toxicidad y, por descontado, al propio tejido industrial del país.

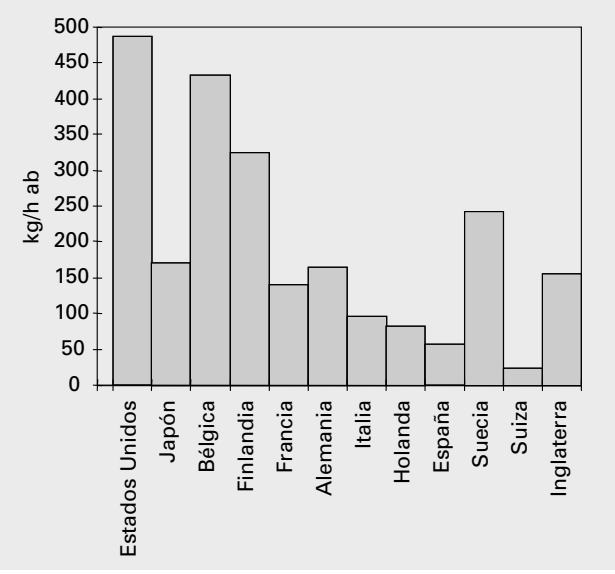


Figura 1.14. Generación de RTP's (kg/habitante) en algunos países de la OCDE, 1992.

La Tabla 1.6 expone la distribución en la generación de los residuos en España, según datos extraídos de diversas fuentes. Si se distribuye dicha cifra por los 365 días del año y 43,0 millones de habitantes, resulta que cada ciudadano español ha producido una media de 22,5 kg. de residuos diariamente.

Tabla 1.6. Naturaleza y clasificación de los residuos

	Mt/año	%
Residuos sólidos asimilables a RSU	**63,7**	**18,0**
Residuos domiciliarios	25,8	7,3
Fangos de depuradoras	4,3	1,2
Escombros y derribos	33,5	9,5
Residuos industriales	**14,4**	**4,1**
Inertes o asimilables a urbanos	12,6	3,6
Tóxicos y peligrosos	1,9	0,5
Residuos mineros	**94,2**	**26,7**
Residuos mineros	94,2	26,7
Residuos agroalimentarios	**180,5**	**51,2**
Residuos forestales	23,5	6.7
Residuos agrícolas	47,1	13,3
Residuos ganaderos	78,5	22,2
Residuos de mataderos	31,4	8,9
Total	**352,8**	**100,0**

Es evidente que, para prevenir el colapso de los medios de producción y del propio planeta, no se puede proseguir con este ritmo de generación de residuos, debiendo reducirse su generación, o en último caso, mitigarla mediante el fomento de la reutilización y del reciclaje.

Vale la pena hacer unos comentarios sobre la tabla anterior:

- España no es un país minero. No dispone de minería energética y muy poca metálica, ambas las más conflictivas desde el punto de vista ambiental, no obstante, la incidencia es del orden de 6 kg/hab y día. En comparación, Chile, un país minero por excelencia, esta cifra sobrepasa los 275 kg/hab y día.
- Dejando al margen los residuos forestales, los denominados residuos agroalimentarios representan casi el 50% de la generación total de residuos. Algunos de ellos, como es el caso de las deyecciones ganaderas son difíciles de cuantificar a escala nacional. Así, solo en el caso de Cataluña, en el 2000, se registraron 12.000.000 m^3 de purines de cerdo y 7.000.000 t de deyecciones de otras cabañas. Los efectos secundarios derivado de ello son incalculables: suelos contaminados, freáticos inservibles, etc.

Es decir, que dejando al margen los residuos mineros que, como se ha visto pueden distorsionar mucho los resultados, cualquier país industrializado genera del orden de 16 kg/hab y día. A título de conclusión hay que reconocer que el ciudadano tiene poco margen de actuación y debe ser la administración las que impulsen campañas de minimización o, en su defecto, potencie la recogida selectiva.

1.5.3. La competencia administrativa en materia de residuos

Por lo general, en todos los países de la UE la competencia en materia de residuos es asumida por el Ministerio de Medio Ambiente que es quien determina la vía de gestión que debe aplicarse a cada uno de ellos. Sin embargo, en muchos países, España entre ellos, se añade una distinta distribución de competencias, en relación a ciertos residuos, que atañe a diversos ministerios, por ejemplo:

- La competencia en materia de residuos hospitalarios, los cuales deberían incardinarse en los industriales tóxicos y peligrosos, pertenece de forma conjunta a los Ministerios de Medio

Ambiente y Sanidad. Algo semejante sucede con ciertos residuos procedentes de mataderos.
- Los residuos ganaderos comparten su «titularidad» entre los ministerios de Agricultura y Pesca y Medio Ambiente.
- Los residuos radioactivos son competencia del Ministerio de Industria.
- Los residuos mineros dependen del Ministerio de Obras Públicas y Minería.

A todo ello hay que añadir que, en España, la gestión del medio ambiente se halla transferida a las Comunidades Autónomas donde la distribución de sus Departamentos (el equivalente al Ministerio) difiere en la mayoría de las autonomías, así como las funciones que les son atribuidas. Todo ello contribuye a crear un panorama confuso a nivel nacional que se acaba de complicar con asunción por parte de los entes locales, Ayuntamientos en su mayor medida, de las funciones que les corresponden como responsables directos de la gestión de los llamados residuos sólidos asimilables a urbanos que, en el caso de España, suponen el 18%.

Pese a que, lo deseable sería que una única Administración se hiciese cargo de establecer los criterios tanto legales como técnicos que han de regir la actuación de los diferentes agentes económicos implicados en la gestión de residuos, a fin de unificar dicho campo de actuación en el conjunto del territorio español y ejercer una acción vigilante y fiscalizadora, lo cierto es que esta gestión, al depender de diversas Administraciones (de ámbito autonómico y local), implica una disparidad de criterios, que, al final, generan confusión e inseguridad jurídica y favorecen, asimismo, la mala gestión de los residuos lo que, a su vez, redunda en perjuicio de la sociedad.

1.5.4.. La jerarquización en la gestión de los residuos

La generación de residuos es tan elevada que las autoridades ambientales han tenido que fijar, como indica la Figura 1.15, un orden en la gestión de los mismos ya sean industriales, mineros o RSU, que esencialmente consiste en tres fases:

- *Minimización.* Mediante el cambio de materias primas o procesos. A estos nuevos procesos, que generan menos residuos y consumen menos energía, están dirigidas las BAT's. Las autoridades ambientales destinan dinero a mejorar los procesos productivos si se encaminan por estos derroteros.

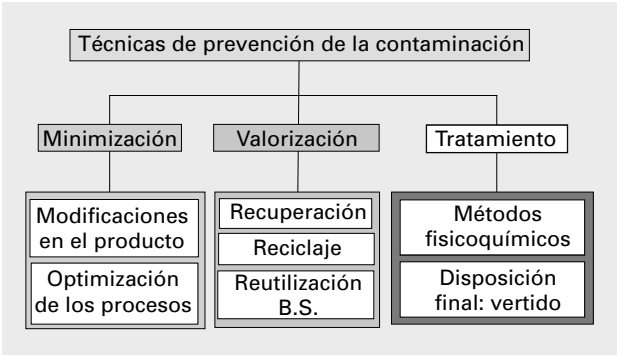


Figura 1.15. Jerarquización en la gestión de los residuos.

- *Valorización.* Usando cualquier tipo de tecnología que permita volver a emplear el residuo. En esta etapa se halla incardinadas las Bolsas de Subproductos (BS) y las valorizaciones energéticas. Esta obra esta escrita en este espíritu. Por lo general, para evitar incurrir en técnicas de competencia desleal, las autoridades alientan estas prácticas pero no las subsidian.
- *Tratamiento.* O disposición final en vertederos, ya sea directamente o previo pretratamiento, como son los métodos fisicoquímicos. Las autoridades gravan económicamente esta práctica para desincentivar su uso y, a la vez, recaptar un dinero que se emplea en fomentar la minimización.

La reutilización, consiste en recoger los materiales e introducirlos de nuevo en los procesos de producción y consumo, en lugar de destinar estas sustancias a las corrientes de residuos. La reutilización requiere de una serie de cambios en las prácticas que tienen lugar dentro de las plantas de producción, con el fin de poder transformar estos residuos en materias primas secundarias.

El mismo concepto se aplica a reciclaje, aunque este concepto implica separación y tratamiento de materiales. La diferencia entre el reciclaje y la reutilización, radica en el hecho que el reciclaje requiere de una mayor y más compleja estructura organizativa, económica y tecnológica, mientras que la reutilización normalmente puede tener lugar en las mismas plantas productoras, y puede ser realizada por los mismos generadores de residuos.

De todo lo que antecedente, se pueden extraer algunas conclusiones, que en general son muy negativas como:

- El progreso, motor del estado del bienestar, lleva implícito su cara perversa que es el fomento

del despilfarro y el consumo con la moda del «usar y tirar» que ocasiona un gasto inútil y genera una gran cantidad de residuos. El término residuo debe entenderse en el sentido más amplio de la palabra: comprar un objeto «protegido» con gran cantidad de envoltorios genera residuos superfluos, pero utilizar abusivamente el automóvil produce polución atmosférica que también se puede considerar como un residuo, lo mismo que acontece con determinadas prácticas agrícolas de riego indiscriminado de los campos, en particular al aplicar fertilizantes y productos fitosanitarios.

- En el ámbito industrial la problemática es parecida. Es preciso ir adaptando e introduciendo las denominadas tecnologías limpias que minimizan la generación de residuos y producen los mismos productos, o mejores, con menos materias primas y menor consumo energético.
- Si todos los países en vías de desarrollo intentaran llegar a las cotas de bienestar, o consumo, que disfrutan los países industrializados, se produciría un colapso tanto en el mercado de las materias primas como en el suministro de las fuentes de energía.

Actualmente, el 20% de la población consume el 80% de la producción mundial. De este gran desequilibrio nace el concepto de desarrollo sostenible, puesto que si toda la población mundial consumiera como la de los países desarrollados, los recursos disponibles de la Tierra serían insuficientes. Se establece como desarrollo sostenible aquel sistema que permite un crecimiento no agresivo con el entorno.

La única faceta positiva estriba en que el propio desarrollo tecnológico pone a disposición del mercado una gran diversidad de tecnologías industriales que permiten el aprovechamiento de los residuos producidos. Esta es la línea que sigue este libro.

1.5.5. Los gestores de residuos

Los gestores de residuos son los encargados de recoger los mismos en el punto de generación y valorizarlos o tratarlos de acuerdo con la legislación vigente. La actividad de tratamiento de residuos, se contempla específicamente en los epígrafes 5.1 y 5.3 del Anexo I de la Directiva 96/61/CE IPPC y la Ley nacional 16/2002, correspondientes a los 10.1 y 10.5 de la *Llei 3/98* IIAA (catalana). Corresponde a código NACE 90.

Cabe destacar que la actividad de tratamiento de residuos (epígrafes 5.1 y 5.3 / 10.1 y 10.5), corresponde en general a las instalaciones de valorización y eliminación de residuos peligrosos y no peligrosos, con exclusión de la incineración de residuos municipales (5.2) y vertederos (5.4), que se halla especificada en la Tabla 1.7.

Aunque les corresponda el código NACE 90, no resulta del todo clara la correspondencia de estos epígrafes con los códigos CNAE que se suele manejar de acuerdo a la vigente Clasificación Nacional de Actividades Económicas CNAE-93 REV.1 (Real Decreto 330/2003 de 14 de marzo). Los siguientes códigos CNAE-93 REV.1 tienen relación con la actividad de tratamiento de residuos:

90020-Recogida y tratamiento de otros residuos (CNAE-93 90002-Actividades de limpieza de vías públicas y tratamiento de desecho): Esta clase comprende:

- La recogida de residuos de los hogares y empresas por medio de cubos de basura, contenedores, etc.

Tabla 1.7. Categoría fuente de actividades por sectores económicos

Código IPPC	Categorías (Actividades del anexo I)	Capacidad de producción	Sectores económicos	Código NACE
5	Gestión de residuos			
5.1/5.2	Instalaciones para valorización o tratamiento de residuos peligrosos.	> 10 ton/día	Tratamiento y eliminación de residuos.	90
	Instalaciones para incineración de RSU.	> 10 ton/día	Tratamiento y eliminación de residuos.	90
5.3/5.4	Instalaciones para la eliminación de residuos no peligroso.	> 50 ton/día	Tratamiento y eliminación de residuos.	90
	Vertederos, con exclusión de los vertederos para residuos inertes.	> 10 ton recibidas/día, o > 25.000 ton de capacidad total		90

- La recogida de residuos peligrosos, pilas y baterías usadas, aceites y grasas usados, etc. la recogida de aceite usado del transporte y talleres mecánicos.
- La recogida de residuos de construcción y demolición el funcionamiento de centros de recogida de residuos, la eliminación de residuos por incineración u otros medios.
- El vertido de desperdicios en tierra o en el mar, su enterramiento.
- El tratamiento y eliminación de residuos radiactivos de transición procedentes de hospitales, etc.
- El tratamiento y la eliminación de animales tóxicos vivos o muertos u otros residuos contaminados.
- El tratamiento de residuos para su destrucción obteniendo como subproducto el compost.
- La eliminación de bienes usados, como frigoríficos, con el fin de eliminar los residuos nocivos.
- El alquiler de aseos portátiles.

Esta clase no comprende:

- La recogida de residuos dentro del comercio de chatarra y productos de desecho (véase 51.57).
- El tratamiento de sustancias alimenticias residuales de la elaboración de productos alimenticios (véase 15).
- El tratamiento de productos residuales del sacrificio de animales para de la producción de alimentos animales (véase 15.7).
- El reprocesado de combustibles nucleares y el tratamiento de residuos nucleares radiactivos (véase 23.302).
- El compostaje de residuos orgánicos (véase 24.15).
- La conversión de residuos de productos alimenticios, bebidas y tabaco en materia prima secundaria (véase 37.20).
- El tratamiento de desechos y chatarra sin un verdadero proceso de transformación mecánica o química, destinado a la venta a terceros, como desguace de automóviles, maquinaria u ordenadores o la clasificación y compresión de residuos de papel, textiles, plásticos, madera etc. (véase 50, 51, 52).

90030-Actividades de saneamiento, descontaminación y similares (CNAE-93 90002-Actividades de limpieza de vías públicas y tratamiento de desecho 90003-Otras actividades de saneamiento público): Esta subclase comprende:

- La descontaminación de suelos y aguas subterráneas en el lugar de contaminación, bien *in situ*, bien *ex situ*, con métodos mecánico-químicos o biológicos.
- La descontaminación y limpieza de aguas superficiales tras una contaminación accidental, por ejemplo mediante recogida de contaminantes o aplicación de sustancias químicas.
- La limpieza de vertidos de petróleo en tierra, aguas superficiales, océanos y mares (incluidas las costas).
- La recogida de la basura de los contenedores y papeleras colocados en lugares públicos.
- El barrido y riego exterior de calles, plazas, senderos, jardines públicos, parques, etc.
- La eliminación de hielo y nieve de carreteras o pistas de aterrizaje en aeropuertos (incluido el esparcido de sal o arena, etc.).
- El despeje de minas y similares (incluso mediante detonación) de las obras de construcción.
- Las actividades especializadas de control de otros tipos de contaminación.

Esta clase no comprende:

- La limpieza de acequias y la lucha contra las plagas agropecuarias en beneficio de la actividad agraria (véase 01.41).
- La purificación de aguas subterráneas para el suministro de agua (véase 41.00).
- Las labores de retirada de tierras superficiales contaminadas dentro de las actividades de construcción (véase 45.11).
- El rellenado de suelos (véase 45.112).
- El transporte de suelo contaminado ya retirado por terceros (véase 60.242).
- Los ensayos y análisis técnicos (véase 74.30) y las labores de desamiantado (véase 45.253).
- La desinfección, desratización y desinsectación de edificios (véase 74.70).
- Las actividades relacionadas con las aguas residuales (véase 90.01).

En lo que refiere al «BREF para la Industria de Tratamiento de Residuos» que trata sus MTDs específicas y límites de emisión de los parámetros característicos de la actividad, se ha publicado en agosto de 2005. Por supuesto las instalaciones dedicadas

a tal actividad deben informar al EPER autonómico (EPER-CAT) y nacional (EPER-España) en lo que refiere a emisiones a la atmósfera y las aguas, debiendo controlarse mediante los métodos de medición determinados que se han descrito antes.

1.6. NOCIÓN DE RESIDUO CERO

La ecología industrial es una disciplina que intenta reproducir en los ciclos industriales lo que la naturaleza realiza en los ecosistemas naturales. Es difícil conseguir la valorización integral de residuos para alcanzar la fase de residuo cero, aunque las nuevas tecnologías y la integración de los sistemas de valorización abren nuevas vías para la consecución de este objetivo.

1.6.1. El residuo cero en la gestión de fangos

Se ha elegido este proceso ya que la generación de fangos de EDAR va en aumento. España está lejos de depurar el cien por cien de sus aguas residuales, lo que significa que la cantidad de fangos aumentará extraordinariamente en los próximos años.

La Figura 1.16 reproduce el proceso global de valorización de fangos de EDAR para obtener, al final unas cenizas que son vitrificadas y valorizadas. Por tanto se trata de un proceso de residuo cero.

El único residuo generado es el polvo proveniente del filtro de mangas del lavado de gases. Esta fracción, en caso de emplearse hornos de vitrificación de «capa fría», también se puede vitrificar, con lo que el proceso cumple con el principio del residuo cero, habiendo valorizado la energía del propio fango. Las fases del proceso están bien explicadas en el capítulo destinado a los fangos de EDAR.

Así pues y tal como muestra la Figura 1.16, de la entrada de los fangos al proceso de conversión energética solo sale:

- Energía en forma de calor (podría también ser electricidad).
- De la vitrificación un árido inerte que como tal se puede añadir al hormigón o bien fabricar baldosas (pavimentos y azulejos).

Completando la gasificación con la vitrificación, puede hablarse de un proceso de residuo cero.

1.6.2. El residuo cero en la desalación

España tiene un grave problema de abastecimiento de agua potable y todos los expertos auguran un empeoramiento en las décadas venideras. Por tanto es lógico que se intente desarrollar procesos que, energéticamente sean autosostenibles y de residuo cero.

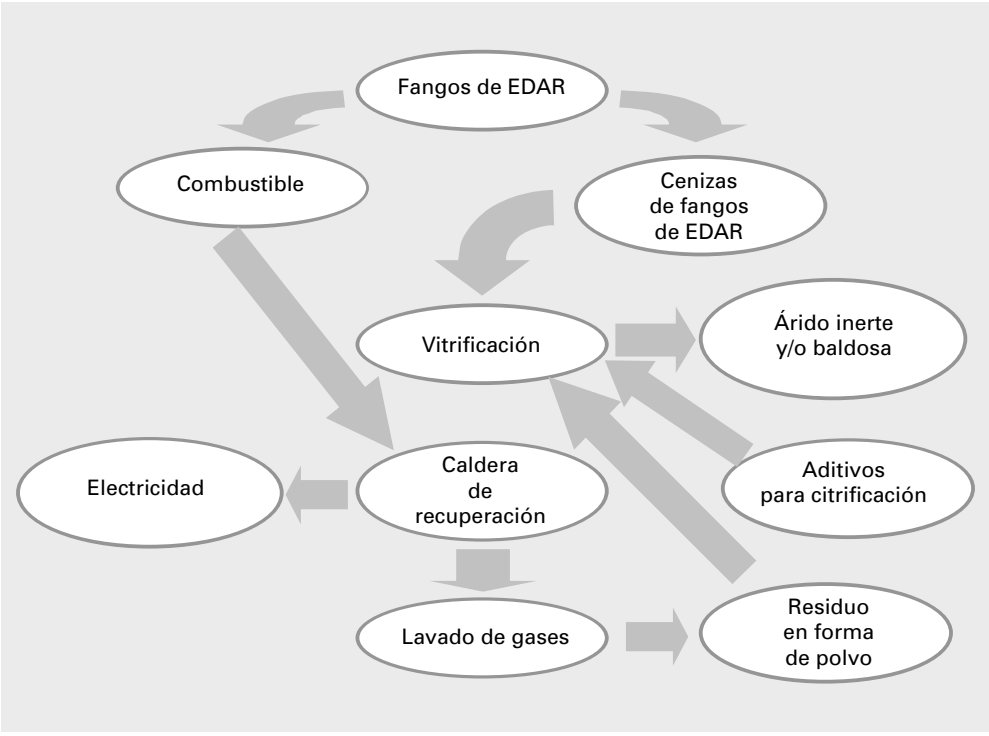


Figura 1.16. Esquema de valorización de fangos de EDAR con residuo cero.

En el caso de la desalación de agua de mar, el vertido del concentrado (salmuera) concita grandes interrogantes y su acción a gran escala puede provocar un grave problema en el ecosistema marino. La salmuera es un residuo compuesto por NaCl y agua. La concentración de sal está alrededor de 80 g NaCl/l. Para solventar el problema, de momento no existe otra tecnología que la evaporación. Esta es muy cara, incluso usando reactores de destilación en varias etapas. Por tanto habrá que recurrir a una fuente que proporcione energía abundante y barata.

En el campo de los residuos, la mejor de las materias primas es la biomasa. Como fuente de energía también puede usarse la energía solar térmica para producir vapor pero, por obvios motivos se trataría de un proceso discontinuo, si bien durante la noche podría emplearse la biomasa. La Figura 1.17 muestra un esquema del proceso.

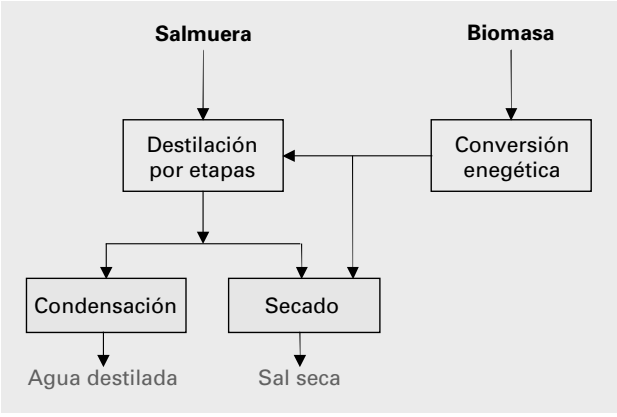


Figura 1.17. El residuo cero en la desalación.

La sal seca tiene muchas aplicaciones y, sobre todo se puede almacenar sin peligro de contaminar. El otro «residuo» es agua destilada. El proceso, que puede parecer algo utópico a finales del 2006, será una realidad en los próximos años cuando la energía alternativa se torne más asequible y el agua un bien escaso.

Entroncando con la sostenibilidad de los sistemas, uno de los principales destinatarios del agua es la agricultura. Si bien es verdad que en algunas partes se usa un sistema de riego avanzado esto, posiblemente, va a resultar insuficiente en un futuro próximo por lo que en muchos centros de investigación se recurre a la ingeniería genética. Ya existen plantas, modificadas genéticamente, capaces de perder el 95% de su contenido en agua y sobrevivir reduciendo el metabolismo durante la sequía hasta que pueden volver a entrar en contacto con el agua.

1.6.3. RSU. Una experiencia global de residuo cero

En el caso de los RSU en los últimos años se han venido desarrollando programas municipales tendentes a reducir la cantidad de RSU que, por lo general, termina en el vertedero. Algunas de estas iniciativas usan precisamente la frase «residuo cero» para enfatizar la minimización y el reciclaje. Algunos ejemplos se citan seguidamente:

- Toronto, Canadá, redujo en un 30% la cantidad de basura para enterrar. Se propone llegar a 2010 sin desechos para vertederos.
- En 2001, Nueva Zelanda se convirtió en el primer país regido por un programa de Basura Cero a nivel nacional.
- San Francisco, California, Estados Unidos, se propuso reducir un 75% la basura para 2010.
- Seattle, Washington, Estados Unidos, busca llegar al 60% de reciclaje en 2008.
- Kamikatsu, Japón, pretende llegar a cero desechos en 2020.
- El Consejo de *Bath and North East Somerset*, Reino Unido, adoptó un programa de Basura Cero con objetivos escalonados para los próximos seis años.

1.7. LOS LÍMITES DEL RECICLAJE

El reciclaje de materiales, como cualquier otra actividad, tiene unos límites técnicos que son los que se comentarán en el presente apartado. Al margen de estos, existen unos límites económicos que, habitualmente obedecen a otras razones o intereses difíciles de concretar.

1.7.1. Límites energéticos

En primer lugar es preciso conocer la energía asociada a cada material. Un caso bien conocido lo constituye el aluminio. Este metal se extrae de la bauxita por medio del proceso Bayer, sistema altamente demandante de energía. Es decir, el aluminio que constituye un bote contiene una gran cantidad de energía. En cambio, para contener un mismo producto, un papel parafinado contiene mucha menos energía. Así pues, desde el punto de vista de la preservación del medio ambiente siempre será aconsejable reciclar el aluminio entes que el papel. Para estos análisis es imprescindible el ACV (análisis del ciclo de vida).

Otro ejemplo sería el reciclaje de plástico procedente de lugares geográficamente dispersos, por ejemplo envases de plástico generados por una comunidad que habita en viviendas esparcidas en el territorio. Será preciso analizar la energía que se va a consumir para recoger y transportar estos plásticos hasta el gestor. Una vez allí hay que gastar energía para limpiarlos, triturarlos y grancearlos. Finalmente habrá que usar más energía para conformar el material reciclado. Muy probablemente, el ACV, indicará que es más ecológico convertirlos en energía directamente en lugar de reciclarlos.

1.7.2. Límites impuestos por la cantidad de contaminantes

Los compuestos y elementos contaminantes, en mayor o menor cantidad siempre están presentes en las materias primas y, obviamente, en los residuos. Además, en estos últimos existen otros contaminantes externos procedentes de su empleo. La posibilidad del reciclaje suele ser una función de la naturaleza del contaminante y del material que se desee obtener. Unos ejemplos ayudarán a clarificar los conceptos:

- *Papel*. Las tintas contienen colorantes que, a su vez están formadas por metales pesados (sobre todo las tintas más antiguas). Si este papel vuelve a procesarse para convertirse en papel prensa, no existirá, en la práctica, ningún peligro por la presencia del metal. Por el contrario, si el papel se va a emplear como parte integrante del compost, una parte del papel lixiviará con la humedad y con él lo hará también el metal.
- *Vidrio*. Los contaminantes, óxidos de metales pesados, permanecerán en la estructura del vidrio sin ninguna posibilidad de salir al exterior por mas veces que se recicle. Ni entrañará peligro alguno durante las etapas de recogida, fusión y cuando se haya transformado en un nuevo envase. Si el contaminante fuese orgánico, ajeno por tanto al vidrio, resultante de un resto orgánico del anterior contenido, se deberá lavar antes de triturar y volver a fundirlo. En este caso la discusión estaría entre si es más ecológico la reutilización (limpieza del envase y depuración de las aguas resultantes) o el reciclado: nueva fusión. A ello también ayuda mucho el ACV.

Por tanto es preciso analizar la naturaleza del contaminante, el proceso de reciclado y el uso al que va a destinar el material reciclado. No puede darse un veredicto a *priori*.

1.8. EL RECICLAJE Y LA CIENCIA DE LOS MATERIALES

Los materiales disponibles en ingeniería son diversos y se distinguen fundamentalmente por su composición química, estado (sólido, líquido y gaseoso), estructura (cristalina, amorfa), sus diferentes fases, impurezas y distribución de estos componentes.

1.8.1. Composites

Se llaman a sí a los materiales compuestos de dos o más elementos. Un clásico es el «*tetra bric*» lámina formada de capas sucesivas de papel, polietileno y aluminio. Cada elemento confiere una característica especial y el conjunto permite la confección de una forma geométrica especial (paralepípedos). En términos más amplios, el composite es el resultado de la asociación de uno o varios materiales reforzantes (generalmente en forma de fibra) y un ligante o matriz. Es decir, las propiedades del conjunto exceden en mucho a cada uno de los elementos simples que lo conforman. De ahí que los materiales compuestos (composites) sean cada día más populares y su número se incremente día a día.

La parte negativa de estos materiales compuestos surge a la hora del reciclaje. Es decir, de que manera se separan y recuperan los diversos componentes o, bien como se recicla sin separar. Esta obra va a usar la ciencia de los materiales para ayudar al reciclaje.

La clasificación más usual de los materiales distingue los metales y sus aleaciones, los polímeros orgánicos y las cerámicas y vidrios. Éstos tres se consideran materiales «puros». Dentro de la ciencia de los materiales, la cerámica ha ido adquiriendo mayor importancia día a día hasta convertirse en uno de estos tres componentes básicos que en la actualidad reconoce la comunidad internacional.

Las diferencias en las características de cada grupo tienen su origen en diferencias básicas que hay en el enlace entre átomos y grupos de átomos. La Figura 1.18 intenta señalar los «materiales puros» y sus posibles combinaciones que, a grandes rasgos, se podría decir que son los materiales compuestos.

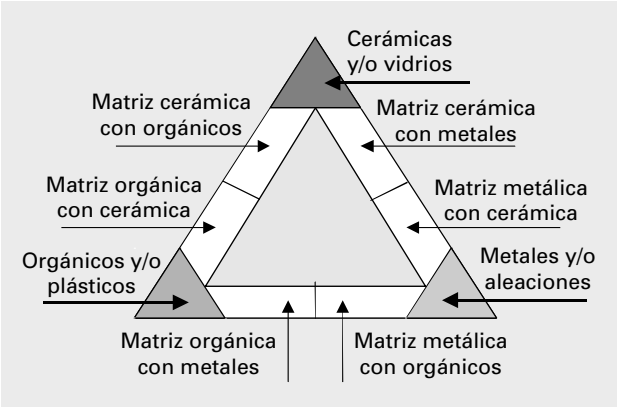


Figura 1.18. Las clases de materiales.

1.8.2. Metales y aleaciones

Los metales (acero, cobre, aluminio, etc.) se basan en una red cristalina regular de un elemento metálico, en la cual pueden mezclarse cantidades variables de uno o más metales diferentes u otros compuestos (aleaciones: bronce, latón, etc.). El enlace metálico se caracteriza por no fijar los electrones a ningún átomo en concreto, de donde se deriva su buena conductividad eléctrica y térmica. Las propiedades más destacadas de estos materiales son: densidad relativamente elevada, resistencia mecánica alta, rigidez elevada, buena ductilidad y estabilidad química de media a baja (Esta aseveración ha de entenderse en términos generales, puesto que el oro, el platino, el cobalto, etc., presentan una elevadísima estabilidad química frente a agentes agresores).

En el campo del reciclaje de residuos, la fusión y obtención de nuevas aleaciones a partir de chatarras residuales es una práctica tan vieja como la propia humanidad. Existen determinados hábitos que deberían erradicarse, al menos de la manera en que se desarrollan hoy en día. Un ejemplo flagrante es el uso del plomo. Si ya se ha eliminado de la gasolina, como podemos seguir usándolo, en España, en la caza (6.000 t, en forma de 50.000 millones de perdigones y 100 t en forma de «plomos» en la pesca, solo en 2003). Si se trata de un metal pesado que puede contaminar suelo y agua, ¿no sería más lógico fabricar los perdigones con vitrificados que tendrían una densidad similar pero un efecto casi nulo para el medio ambiente?

1.8.3. Los materiales orgánicos

Los polímeros se basan en macromoléculas orgánicas resultado de la polimerización de uno o más monómeros. Desde el punto de vista de los materiales el polímero tiene limitadas aplicaciones prácticas e industriales puesto que carece de resistencia mecánica y poca estabilidad química (Como siempre la excepción confirma la regla: ciertos «nylones», tienen una resistencia mecánica superior al acero y otros plásticos se han revelado muy resistentes químicamente). Por ello es preciso adicionarle otros componentes. Así la mezcla de polímeros con aditivos recibe el nombre genérico de plásticos. Los aditivos pueden ser de diversa naturaleza: estabilizantes (para reducir el efecto de degradación que ejerce la radiación solar), plastificantes (como los ftalatos, en el caso del PVC blando, para poder ser conformado), colorantes, etc.

Los enlaces que configuran las macromoléculas son de tipo covalente, lo que no facilita la conducción eléctrica ni térmica. Los materiales basados en polímeros incluyen los plásticos, los elastómeros y muchos de los componentes de los materiales compuestos (la mayoría de matrices y algunas fibras). Las propiedades generales más destacadas son: densidad baja, resistencia mecánica baja, rigidez baja o muy baja, buena ductilidad (salvo los termoestables y elastómeros), conductividad eléctrica y térmica muy bajas (salvo excepciones) y estabilidad química elevada.

La aplicación al terreno del reciclaje de residuos es muy amplia comenzando por los papeles y la madera. La inmensa mayor parte de los plásticos son reciclables. Los poliéster reforzados con fibra de vidrio (matriz orgánica con fibra de vidrio) o el polietileno reforzado con acero constituyen algunos ejemplos.

Un caso bien típico de este grupo es el neumático: matriz orgánica con un armazón de fibra de acero, al que habrá que prestar gran atención ya que, a partir de 2006, estará prohibido gestionarlo en vertederos de la UE aunque se hallen triturados.

1.8.4. Cerámicas y vidrios

Las cerámicas se basan en compuestos químicos de composición fija, formados por óxidos metálicos y no metales. Tienen una gran variedad de composiciones químicas que se refleja en una gran diversidad de estructuras cristalinas. Las propiedades más destacadas son: densidad relativamente baja, resistencia mecánica moderadamente elevada, rigidez muy elevada, gran fragilidad, conductividad eléctrica y térmica bajas y estabilidad química muy elevada.

Tabla 1.8. Comparativa de propiedades entre los grupos de materiales

Propiedad	Metales	Polímeros	Cerámicas
Densidad	1,75-9,00 Mg/m^3	0,85-2,20 Mg/m^3	2,20-5,60 Mg/m^3
Resistencia mecánica	50-2500 MPa	1-100 MPa	50-850 MPa
Rigidez	40-240 GPa	0,001-10 GPa	60-460 GPa
Ductilidad	Buena	Buena	Fragilidad
Conductividad (Eléctrica y térmica)	Elevada	Muy baja	Baja
Estabilidad química	Media o baja	Elevada	Muy elevada

En el terreno de la fabricación de membranas para el tratamiento de aguas hay que destacar una nueva membrana nanoporosa orgánica con sílice. Y las membranas de nanosílice aptas para separar el nitrógeno del oxígeno del aire.

En el campo del reciclaje, tanto la cerámica como el vidrio son, por si solos perfectamente reciclables. Las combinaciones entre ellos son infinitas: El hormigón armado (matriz cerámica) y acero permite un perfecto reciclado.

Tanto el estudio de los «materiales puros» como sus combinaciones se citan por su importancia y las dificultades relativas que presentan a la hora de su reciclaje. En la Tabla 1.8 puede observarse la comparativa general entre los tres grandes grupos de materiales.

En el campo de las cerámicas avanzadas vale la pena resaltar aquellas que se emplean en aplicaciones especiales:

- Prestaciones mecánicas a alta temperatura.
- Conducciones, válvulas y turbinas para líquidos muy agresivos y/o a alta temperatura.
- Transductores y sensores.
- Propiedades eléctricas y aplicaciones electróncas.
- Purificación y filtrado de agua y gases.

En el DVD adjunto, en el punto 2, se muestra información sobre cerámicas avanzadas.

1.8.5. Los superconductores

Se denominan así a aquellos materiales que al pasar la electricidad a través de ellos no se calientan por efecto Joule. El conductor eléctrico industrial por excelencia es el cobre. Sin embargo las minas de cobre tienen una ley muy baja, lo normal es que no alcancen un 1% de metal, lo que equivale a decir que la cantidad de residuos para generar cobre puro es enorme (hay que ser conscientes de que por término medio, la producción de 1 kg de cobre produce 500 kg de residuos). Un material que lo sustituya indica que la producción de residuos se reduce de formas drástica.

Los cables superconductores se caracterizan por su elevadísima densidad de corriente y mínimas pérdidas. Desde el punto de vista ambiental su empleo supone un gran ahorro de energía y un ahorro de materiales. A título de ejemplo, la Tabla 1.9 muestra las diferencias entre un cable convencional y otro superconductor, en corriente alterna (CA) o corriente continua (CC) que es donde se potencia la superconductividad.

Hoy en día se están usando gran cantidad de combinaciones para conseguir la superconductividad. Uno de ellos es el compuesto $HoBa_2Cu_3O_{7-x}$ (HoBCO) desarrollado por Sumitomo Electric o el $(Bi, Pb)_2Sr_2Ca_2Cu_3O_x$ (Bi2223).

Tabla 1.9. Comparación de parámetros ambientales y económicos derivados del uso de superconductores

	Corriente continua		Corriente alterna
	Convencional	Superconductor	Superconductor
Capacidad transmisión MVA	500 · 3	375 · 2 · 2	1.500
Voltaje kV	275	66	130
Corriente transmitida kA/fase	1	3,3	12
Tamaño cable mm	140	135	135
Numero de cables	9	4	1
Pérdidas por transmisión kW/km	740	200	20
Emisión de t CO2/km/año	778	210	21

El DVD adjunto, en el punto 3, muestra información adicional sobre superconductores.

1.8.6. Los nanomateriales

Este apartado es propio de tecnologías avanzadas o de un tratado de materiales. No obstante, se cita en esta introducción para explicitar que la ciencia de materiales puede ser una «tecnología limpia» que ayuda a minimizar la generación de residuos (Por ejemplo un nanomaterial de bentonita, mineral de arcilla, puede sustituir a los compuestos halogenados como retardantes de llama). Por otra parte las nanotecnologías están llamadas a sustituir y optimizar muchos de los procesos industriales que se explican en este libro.

Los nanomateriales son aquellos materiales cuyos cristales se miden en nanómetros (10^{-9} metros), y deben ser menores al menos de 100 nm. La drástica reducción de tamaño da lugar a unas propiedades insospechadas en la materia. Los materiales metálicos y cerámicos son generalmente policristalinos. El cambio de escala de micrómetros (10^{-6} metros) a nano (cuya etimología proviene del latín «nanas» o enano) altera una serie de propiedades físicas (básicamente debido a que el aumento de la superficie específica derivada de la reducción de tamaño, provoca la presencia de mayor cantidad de átomos en la superficie que en el interior del cuerpo). Así, cuando el tamaño de los cristales se mueve en la nanoescala las características de resistencia mecánica aumentan de forma exponencial. En el caso de las cerámicas la resistencia mecánica, así como la eléctrica y la densidad aumentan muchísimo cuando el tamaño de las partículas se halla en el rango de 10-20 nm (nanómetros).

A una escala namométrica los principios de la física y las propiedades de los materiales que se observan son normalmente distintas, siendo necesario recurrir a la física quántica para entender su comportamiento. El verdadero nacimiento de la nanociencia y la nanotecnología se produce con la invención del microscopio de efecto túnel (STM) en 1981 por Binnig y Rohrer (La onda de luz visible tiene una anchura de 380 nanómetros, o sea, no «cabe» en el mundo de las moléculas. Así el ADN mide unos dos nanómetros de ancho. Este aparato, el STM, mide la corriente eléctrica que fluye entre una finísima punta metálica y una muestra). Lo importante de comprender es que la nanociencia es la escala en que trabaja la naturaleza. Un átomo mide apenas un nanómetro, un glóbulo rojo sanguíneo 7.000 nanómetros y un pelo humano 80.000 nanómetros.

Como ha manifestado Rodney Brook, director del Laboratorio de Inteligencia Artificial del Instituto Tecnológico de Massachussets: «Nuestro objetivo a 30 años es tener un control tan exquisito sobre la genética de los sistemas vivos que, en lugar de hacer crecer un árbol, cortarlo y hacer con él una mesa, seremos capaces de hacer crecer directamente la mesa». La química convencional ya juega con moléculas para fabricar plásticos, productos químicos o medicinas, entonces donde radica la diferencia. La química tradicional hace reaccionar millones de moléculas, no las controla una a una. Es un matiz importante ya que al manipular la materia a escala nanométrica aparecen propiedades distintas a las habituales en el mundo macro.

En la nanoescala el carbono es más fuerte que el acero y seis veces más ligero. El óxido de zinc en el nanomundo se vuelve transparente, el aluminio se convierte en un material combustible y la plata muestra sorprendentes propiedades antibacterianas. La pérdida de ductilidad que, en algunas aplicaciones se aprecia, puede ser compensada por la mezcla de nano y micro en la escala de tamaño. En el caso del cobre una mezcla del 75% de nano y 25% de micro da lugar a un alambre con una resistencia mecánica seis veces superior a la estándar. Algo parecido acontece con el aluminio y el dióxido de titanio. La resistencia del acero se ha conseguido aumentarla en un 50% a base de empelar formas amorfas, gracias a procesos de fusión.

El nano litio consigue una reactividad muy superior lo que permite fabricar baterías más reducidas y eficientes. En el campo de la cerámica, sin saberlo, artistas de las antiguas dinastías chinas, fabricaron esmaltes con unos efectos ópticos fascinantes derivados del hecho de que el tamaño de ciertas nanoestructuras es inferior a la longitud de onda de ciertos colores.

En la actualidad, las principales aplicaciones de la nanociencia se centran en:

- *Instrumentación.* Nuevas generaciones de microscopios electrónicos. Tecnologías ópticas. Técnicas de impresión, etc.
- *Ciencia de los materiales.* Esencialmente en el reforzamiento de materiales. Los nanofillers que alteran las propiedades de los materiales. Nanocomposites orgánicos con silicatos (arci-

llas) para zonas activas de membranas. SMS's (*Self Assembling Monolayers*) para la fabricación de sensores, cristales líquidos, nuevos lubricantes, alambres moleculares, nuevos materiales transparentes resistentes y traslucidos, pantallas solares a base de óxido de zinc, pinturas, antiabrasivos, nanotubos de carbono para nuevos materiales de aeronáutica, fibras textiles que cambian sus propiedades según las condiciones del medio externo, cosméticos, superficies hidrófobas, etc.

- *Electrónica.* Los nanotubos de carbono (fullarenos) son en realidad variedades alotrópicas del carbono como el grafito o el diamante, parecen ser el futuro de la electrónica ya que pueden ser conductores, semiconductores y aislantes. Los científicos creen que los nanotubos son los candidatos idóneos para sustituir los circuitos electrónicos basados en el silicio, ya que en ellos la electricidad corre sin casi ninguna resistencia. Los nuevos discos duros tienen una capacidad de almacenamiento de datos diez veces superiores a los más modernos. Nuevos materiales para pantallas y discos (CD's), nuevas tecnologías de visualización, nuevos biochips, etc.
- *Ciencias de la vida.* La nanociencia tiene, y tendrá, un enorme impacto en el desarrollo de la medicina (nuevos tejidos y estructuras óseas), sistemas de diagnóstico, detección precoz de enfermedades, ingeniería de transporte de fármacos en nanopartículas, estructuras que descargan insulina en función de los niveles de azúcar o en la agricultura: menor gasto en materias primas, medios para la detección de plagas, métodos para el ahorro de agua y energía.
- *Construcción.* Hormigones reforzados, cementos de nuevas propiedades, asfaltos mas duraderos, nuevos tratamientos a la corrosión, aislantes térmicos y acústicos, etc. En materiales de cerámica y vidrio: nuevos cristales resistentes a altísimas temperaturas, cerámicas y vidrios que no se manchan, resistentes al rallado, cristales fotosensibles, etc.
- *Metalurgia.* Revestimientos de gran resistencia y flexibilidad mejorada, revestimientos no conductores de la electricidad, superficies altamente resistentes a la abrasión.
- *Textil.* Tejidos antimanchas, antiarrugas, aislantes, protectores del agua y el frío, nuevos tintes, etc.
- *Aplicaciones industriales.* Con el desarrollo de nuevos materiales para incrementar el rendimiento de los catalizadores, pilas de combustibles y baterías. Mención especial merecen las células fotovoltaicas fabricadas con *nanorod*, nanomaterial orgánico sensibles a diferentes longitudes de onda de la luz o el nanoetiquetado de billetes.

En el campo de los residuos, muchos investigadores están estudiando la transformación de conchas de animales marinos, diatomeas, para obtener nanoestructuras. Otra aplicación es la conversión en nanoestructuras de la hidroxiapatito (componente principal de los huesos) para reforzar implantes y fabricar prótesis. Un campo de estudio con futuro es la optimización de los carbones activos y negros de humo, ya que muchos de ellos poseen nanoestructuras. Recientemente en Corea se ha patentado un carbón activado con 12 nm de diámetro de poro que tiene una capacidad de adsorción diez veces superior a las variedades comerciales existentes.

El DVD adjunto, en el punto 4, muestra información complenetaria sobre los materiales

1.9. LA SOSTENIBILIDAD

La definición más conocida dice «el desarrollo sostenible es aquel que satisface las necesidades presentes sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer sus necesidades». Sin embargo, si bien el concepto de sostenibilidad es claro resulta algo inconcreto y poco mesurable. Muchos pedagogos recurren a ciertos criterios como la «huella ecológica» (por ejemplo un vulgar cepillo de dientes representa en realidad 1,5 kg de recursos o un teléfono móvil 75 kg). Otros estudios se refieren a la presión humana en forma de terreno. Así mientras la «huella ecológica» que deja sobre el planeta un ciudadano norteamericano es de 9,6 hectáreas, la de un habitante del África subsahariana no alcanza las 1,5 hectáreas y en la UE es de cerca de 5.

Los principales factores de «insostenibilidad« tienen que ver con la energía, el agua, los materiales y el suelo (en particular la ocupación y el urbanismo).

Desde el punto de vista estrictamente energético se podría decir que una práctica, con implicaciones energéticas, es sostenible cuando consume una cantidad de energía moderada que, sobre todo no pone

en riesgo la energía para futuras generaciones. El tratamiento de fangos provenientes de depuradoras de aguas residuales servirá como ejemplo para una reflexión sobre este concepto.

La ingente cantidad de fangos, como resultado de la depuración de aguas residuales, con una humedad muy alta, normalmente el 77% (23% de sequedad) constituye un problema creciente para los países de la UE. La solución más rápida ha sido secar los fangos hasta un 90% a partir de la salida de la planta de deshidratación. Ello ha permitido reducir significativamente el volumen de fangos transportados hasta el vertedero, aunque esta opción es cara, y la cogeneración, usada como soporte económico de la gestión integral resulta poco eficiente. Por esta razón es necesario buscar nuevas vías de valorización de los fangos secados térmicamente que discurran paralelas a las directrices ambientales. Si se tiene en cuenta que el compostaje, empleado tradicionalmente para tratar estos residuos orgánicos, está siendo restringido, la valorización energética deviene una alternativa a tener en consideración.

La valorización energética de fangos de depuradora puede suministrar la energía necesaria para el secado. La Figura 1.19 muestra el esquema de la gasificación de fangos de EDAR, donde se observa cómo se utiliza el calor generado en el proceso para secar el fango húmedo.

La gasificación es una tecnología que permite que la energía contenida en el fango se convierta en energía química contenida en un gas (gas de síntesis), que podrá ser utilizada de forma flexible. Siendo el objetivo eliminar los fangos, se deben aplicar las siguientes etapas en el proceso:

- Generar el gas de síntesis a partir del propio fango, parcialmente secado. El gas se oxida y debe seguir las etapas de tratamiento prescritas en el RD 653/2003, relativo a la cámara de postcombustión. A la salida de la cámara el gas sólo contendrá CO_2, H_2O, gases ácidos, metales y partículas en suspensión.
- Valorizar el calor sensible del gas en una caldera, produciendo vapor o aceite térmico para el secado parcial de los propios fangos. Así se cierra el ciclo energético y no se utiliza energía externa para secar los fangos de EDAR.

El esquema planteado en la Figura 1.19 permite tratar fangos húmedos de EDAR, con una sequedad estándar del 23%. Además el sistema permite emplear plantas de secado mas reducidas, ya que la se-

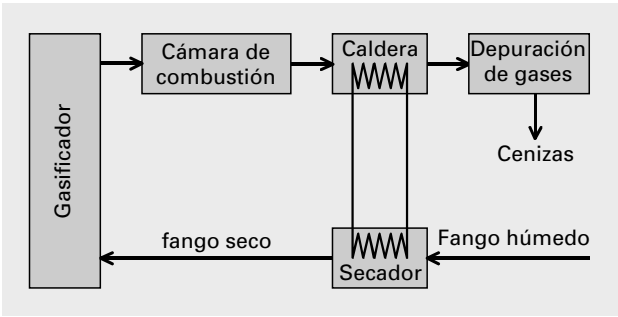


Figura 1.19. Esquema del ciclo energético sostenible de los fangos de EDAR.

quedad a la entrada del gasificador puede llegar a ser del 50%. Si se desean tratar fangos secos procedentes del secado térmico, la energía generada en el gasificador será elevada, siendo aconsejable la generación de electricidad mediante un ciclo de Rankine para disipar la entalpía de los gases.

Los residuos orgánicos, a excepción de los RSU, no suelen valorizarse energéticamente; sólo el potencial energético teórico que representan a escala nacional es de 6.000 $MW_{(e)}$, lo que equivale a seis centrales nucleares. Las tecnologías disponibles de conversión energética permiten a casi todos los sectores industriales la valorización de residuos para disminuir su factura energética. Conviene recordar que los sistemas de valorización energética de residuos reducen las emisiones de gases de efecto invernadero, con un consumo sostenible de la energía.

El sistema de conversión energética tiene que adaptarse a la tipología del residuo a tratar, destacando la importancia de la fracción inorgánica resultante de los procesos térmicos. A veces el residuo secundario es compatible con la propia industria, como es el caso de los fangos procedentes de la industria papelera; si son peligrosos pueden vitrificarse y ser transformados en un producto inerte y depositarlos en un vertedero adecuado. Los residuos inertes pueden emplearse como relleno en taludes.

El modelo propuesto de postratamiento de fangos de EDAR es sostenible ya que no precisa del uso de combustibles fósiles. Además debe añadirse que los sistemas energéticamente sostenibles son más baratos de explotación que los basados en los principios tradicionales.

En una línea diferente pero, quizás mas acorde con la sostenibilidad, el proyecto Aquaphytex (patente de la Universidad Politécnica de Madrid) ha desarrollado un modelo de depuración de aguas residuales a base de microfitas. Se trata de plantas en

cuyas raíces de adhieren las bacterias microbianas que se nutren de la carga contaminante que contiene el agua residual. Es un sistema de geomembranas que además inyecta oxígeno, con lo que no solo depura sino que regenera el agua.

Otra faceta de la sostenibilidad energética sería la que afecta a la vivienda. Dentro de la UE, España es uno de los países con clima más benigno, no obstante la falta de rigor y la especulación ha conducido al absurdo de que una vivienda nueva en España consuma un 40% más de energía que otra similar francesa.

1.9.1. Los organismos modificados genéticamente (OMG)

Parece obligado, a título de introducción, destinar un párrafo a hablar de los OMG, también denominados transgénicos, y su relación con la sostenibilidad. Los OMG se deben diferenciar de acuerdo con las formas básicas de conseguirlos:

Modificando un gen o genes existentes, tal sería el caso del intento de suprimir el gen responsable de la aparición de cuernos en el ganado vacuno o el gen que regula el ablandamiento de los tomates.

Introduciendo un gen pero que pertenece a la misma especie. Como se ha hecho con la introducción de genes de cierto tipo de maíz de Centroamérica (una variedad de Guatemala resiste muy bien el ataque de ciertas plagas) para introducirlo en la variedad cultivada en EE UU. Extrapolando esta tendencia se llegaría a la extinción de ciertas especies interesantes y con ello la pérdida de la biodiversidad.

Introduciendo un gen de un organismo en otro que pertenece a otra especie. Tal es el caso de la creación de un tipo de colza y maíz con la introducción de un gen de una bacteria presentes en los suelos y los hace inmunes al ataque de plagas de insectos.

Los últimos avances en ingeniería genética han llevado a los científicos a conocer el mapa genético de las plantas y poder así incidir sobre sus características. Estas investigaciones han dado lugar al desarrollo de la biotecnología.

Los científicos han introducido genes en las plantas originales, produciendo en éstas nuevas semillas de características diferentes a las iniciales. Las primeras cosechas comercializadas que estaban modificadas genéticamente, fueron plantadas en 1995. Hasta la actualidad la mayor parte de los organismos modificados genéticamente y que se han comercializado son resistentes a las diferentes plagas.

Las diferentes opciones de la nueva tecnología se usan profusamente y puede dar lugar a confusiones, por ello es conveniente aclarar las definiciones básicas:

- La Biotecnología esta definida por la OCDE desde 1982 como «la aplicación de organismos, sistemas y procesos biológicos a la producción de bienes y bienes en beneficio del hombre». Así y para citar un ejemplo sencillo de biotecnología es la introducción de microorganismos para la producción de determinados alimentos como el yogur o el queso.
- La Ingeniería Genética es el conjunto de técnicas que permiten modificar el genoma de los seres vivos, dando lugar a la Biología Molecular. Con ello se modifica el ADN y da lugar, cuando se aplica a los alimentos a los transgénicos.

La aplicación de esta tecnología también ha producido aspectos contrarios a lo que pretendía. Las nuevas proteínas, formadas por la alteración genética, pueden originar trastornos alérgicos a los consumidores. Por otra parte los insectos pueden desarrollar resistencias hacia las toxinas producidas por las plantas, de forma similar a como lo hacen frente a los insecticidas. Finalmente cabe destacar que el efecto de los genes de insecticida puede alterar la población de microorganismos que son los responsables de la degradación de la vegetación.

Las ventajas son igualmente importantes. En primer lugar el empleo de semillas modificadas genéticamente hace las plantas más resistentes a las enfermedades y plagas con lo que se puede reducir o suprimir los productos fitosanitarios. Por otra parte los organismos modificados genéticamente, se perfeccionarán y van a ser la salvación para una serie de pueblos que ahora mueren de hambre.

Para dar una idea de la magnitud de la importancia de los OMG, en 2005 había más de 90 millones de ha con transgénicos (54,5 millones de ha de soja, 21,2 millones de ha de maíz y 9,8 millones de ha algodón) en 21 países. El principal país es EE UU con más del 50% de los cultivos y España ocupa el puesto 14.

1.9.1.1. Aspectos ambientales de los transgénicos

Junto con el peligro de pérdida de la biodiversidad, se pueden destacar aspectos bien positivos del desarrollo de los transgénicos como:

- En la medida que se perfeccionen estas variantes se podrá reducir la aplicación de los fitosanitarios y su gran problema ambiental.
- La fenilcetonuria es una enfermedad hereditaria que afecta a 1 de cada 14.000 recién nacidos producida por una incompatibilidad con la leche (especialmente la materna) que tiene entre otras consecuencias un grave retraso mental y crisis convulsivas semejantes a la epilepsia. Para remediar este problema se ha modificado genéticamente una oveja que da leche casi idéntica a la humana, excepto por los componentes que desencadenan la enfermedad.
- Vegetales transgénicos con tecnología RNA. En este caso, el vegetal deja de fabricar una proteína suya, pero no fabrica nada nuevo. Por ejemplo, el tomate *Flavr Savr*, comercializado es EE UU. No hay riesgos ecológicos por el vegetal (sí pasara el gen a otra planta, no le serviría de nada, al no tener la misma secuencia de mRNA para hibridar, y aunque la tuviera, pues simplemente el fruto se ablandaría más despacio). No hay riesgos para el consumidor, ni siquiera de alergias marginales.
- Tomates resistentes a la sequía, desarrollados en México, a base de modificar el gen que regula el flujo de sustancias químicas dentro y a través de la membrana de las células vegetales.
- El arroz dorado es resultado de desarrollar variedades de arroz que produzcan provitamina A (betacaroteno), como un medio para aliviar las carencias de vitamina A (retinol) en la alimentación de las personas pobres y desfavorecidas de los países en desarrollo. Como las variedades tradicionales de arroz no producen provitamina A, fue necesario recurrir a tecnologías transgénicas. Se insertaron en el genoma del arroz dos genes provenientes del narciso y uno de la bacteria Erwinia uredovora. Estos tres genes producen las enzimas necesarias para convertir el GGDP en provitamina A. Los genes insertados son controlados por promotores específicos, de tal modo que las enzimas y la provitamina A sólo son producidas en el endosperma del arroz. Cuando se ingiere arroz dorado, el organismo humano divide la provitamina A para fabricar vitamina A.

También se pueden citar riesgos ya que al alterar los organismos, se sientan las bases para alterar las relaciones de los mismos con su entorno, con lo que algunas consecuencias pueden ser impredecibles:

- La producción de café descafeinado. Sin embargo, resulta que la cafeína protege el café del ataque de los hongos, en particular del Aspargillus, productores de la terrible aflatoxina.
- Es frecuente el cultivo de peces de crecimiento rápido, y de mayor tamaño, en grandes jaulas flotantes situadas en el mar. Sí a causa de una tormenta la jaula se rompe y se liberan los peces y estos se mezclan con otras especies más feraces, el resultado es bien incierto.
- Uno de los casos mas conocidos es el del maíz transgénico productor de la toxina Bt, insecticida para proteger los cultivos de la plaga del barrenador. El polen de este maíz, que contiene la citada toxina, dispersado por el viento se deposita en la planta lechetrenza, que constituye el único alimento para la larva de la mariposa Monarca. La mitad de las orugas que comen las hojas de la citada planta mueren.

En España, la próxima aprobación (esperada para el año 2007) del Real Decreto para regular la coexistencia de cultivos modificados genéticamente con los convencionales y ecológicos ha despertado inquietud en la comunidad científica local. La distancia de seguridad mínima establecida por el Real Decreto es de 220 metros de separación entre uno y otro tipo de cultivo; distancia que para algunos científicos es «arbitraria y no está justificada científicamente», y provocaría que gran parte de la competitividad de la agricultura española se pierda por no poder cumplir con estos distanciamientos. Este grupo de científicos han establecido que sólo es necesario un distanciamiento de 25 metros para asegurar la competitividad de la agricultura española en todas sus modalidades.

En contrapartida, grupos ecologistas opinan que los cultivos transgénicos pueden poner en peligro la protección de la biodiversidad, la pervivencia de la agricultura convencional y ecológica o la seguridad de los consumidores.

1.9.1.2. Uso de transgénicos para absorber CO_2

En las jornadas de la Cumbre del Clima, celebradas en Milán en Diciembre de 2003 se vieron los primeros resultados de los trabajos realizados por las comisiones técnicas, que no han gustado nada a ciertas organizaciones ecologistas. Y es que la polémica de los organismos genéticamente modificados, o transgénicos, entra de lleno en el debate sobre el modo de aplicar las actividades recogidas en el llamado Mecanismo de

Tabla 1.10. Relación de los principales problemas ambientales

Problema	Fuente	Grupo social
Contaminación aire urbano	Energía, transporte e industria	Población urbana
Contaminación aire interior viviendas	Energía (calefacción y cocina)	Población rural
Lluvia ácida	Energía, combustibles fósiles	Todos
Disminución capa ozono	Tráfico, industria	Todos
Gases efecto invernadero	Energía, tráfico e industria, combustibles fósiles	Todos
Disponibilidad y calidad agua potable	Incremento población y agricultura	Todos
Degradación de las costas	Transporte, energía y turismo	Todos
Deforestación y desertificación	Incremento población, agricultura y energía	Población rural
Residuos tóxicos y peligrosos	Incremento de población, industria y energía.	Todos

Desarrollo Limpio (MDL) a proyectos de reforestación para absorber dióxido de carbono de la atmósfera.

El MDL, que se estableció en el Protocolo de Kyoto, permite a los países con objetivos de reducción que financien medidas de protección del clima en países en vías de desarrollo, descontarse unidades de dióxido de carbono de su cuenta de emisiones. Dentro de este apartado entran los llamados «sumideros» de carbono; esto es, utilizar los bosques y otros cultivos para absorber CO_2. La novedad es que «no se excluye la posibilidad» de que árboles y cultivos genéticamente modificados «puedan ser utilizados en el futuro» dentro de este mecanismo en los protocolos de biodiversidad y de bioseguridad. Además, para que el país que transfiere estos proyectos obtenga estos «créditos de reforestación», que le permitirán descontarse las emisiones contaminantes que se ahorra el país que la recibe, éste último tiene que estar de acuerdo, y además en la cuenta de emisiones del país que se anota el descuento debe especificarse que se ha obtenido a través de OGM.

En síntesis, pese a que sobre este tema se pueden encontrar dos posiciones totalmente opuestas, hay quien argumenta que es la mejor solución para paliar la hambruna mundial y quien dice que traerán más problemas de los que solucionarán. La comunidad científica apuesta claramente por su desarrollo y no tienen constancia de un transgénico perjudicial. En definitiva, se trata de una ciencia que se halla en sus inicios y que con el tiempo logrará superar los inconvenientes y repercutirá positivamente en la humanidad. En la actualidad, 2006, los Ministerios españoles de Agricultura y Medio Ambiente perfilan una normativa para legitimar una normativa que permita la presencia de transgénicos en la agricultura convencional, la ecológica y la generación de plantas de rápido crecimiento.

1.10. PROBLEMAS MEDIOAMBIENTALES COMUNES EN LA UE

En toda la UE y en referencia a los impactos globales, la energía es la principal promotora de los problemas de contaminación como muestra la Tabla 1.10, ya que salvo la disponibilidad y calidad del agua potable, relacionada con el incremento de la población y la agricultura, el resto de los impactos se deben a la actividad industrial, transporte y energía.

En el caso concreto de España vale la pena resaltar las cifras que en julio de 2006 hizo públicas el Ministerio de Medio Ambiente advirtiendo que 159.337 km^2, es decir un 31% de la superficie del país, en particular el levante español, sufre un riesgo alto o muy alto de desertificación y otro 21% el riesgo es medio. Todo ello todavía contrasta más con el hecho de que sea, precisamente, el levante español una de las zonas de la UE donde se construye más y la demanda de agua sea mayor.

Sin embargo resultaría un error atribuir toda la contaminación a problemas antrópicos. La Tabla 1.11 propone diversos ejemplos de contaminación de la atmósfera por causas naturales.

Tabla 1.11. Contaminación natural del aire

Fuente	Contaminate
Volcanes	SOx, partículas
Incendios forestales	CO, NOx y partículas
Vendavales	Polvo y partículas
Plantas (vivas)	Hidrocarburos y polen
Plantas (en descomposición)	CH_4, H_2S
Suelo	Virus, bacterias y polvo
Mar	Partículas de sal

Aunque en el capítulo destinado al tratamiento de los RSU se comentan los resultados de la aplicación de la Directiva sobre envases y embalajes, a título preliminar, y según estadísticas de la DG (Dirección General del Medio ambiente de la UE), en 1997 cada ciudadano de la UE generaba 160 kg de envases y embalajes domésticos al año. En 2002, esta cifra aumentó hasta 176 kg/habitante y año. La Figura 1.20, muestra, a nivel de la UE, cual ha sido la gestión de estos residuos.

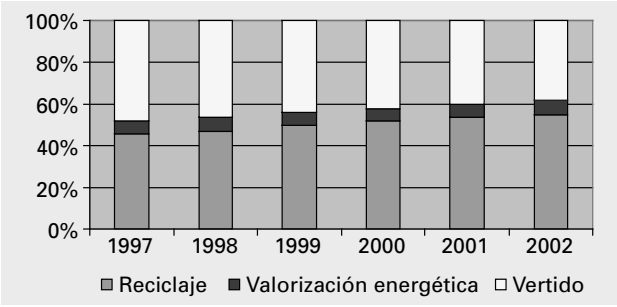


Figura 1.20. Gestión de los residuos de envases y embalajes en la UE-15.

Pese a la entrada en vigor, en todos los países de la unión de la Ley de envases y embalajes, es sorprendente constatar que la cantidad de residuos de envases ha seguido creciendo y que la tasa de reciclaje, en 2002, no llegaba a los umbrales que exige la Directiva.

La UE esta formada por un conjunto de países con climas y hábitos de vida diferentes, no obstante el nivel de renta disponible por persona se ha igualado lo suficiente para que diversas problemáticas ambientales sean semejantes, en particular la generación de residuos y contaminación procedente de bienes de gran consumo como el automóvil, el agua residual, los electrodomésticos, etc. Así la Tabla 1.12 recoge en datos del 2003, la cantidad y tipo de vehículos de Cataluña, que es muy semejante a España y también a la media de la UE.

Tabla 1.12. Cantidad y tipos de vehículos en Cataluña

Tipo de vehículo	Cantidad
Motos	420.000
Turismos	2.985.000
Autobuses, camiones y otros	815.000
TOTAL	**4.220.000**
Vehículos/1.000 habitantes	**629**

La peculiaridad del clima supone, por ejemplo, que en España e Italia existan más motos que la media europea. Sin embargo la cifra de vehículos por cada 1.000 habitantes, con pocas diferencias, se mantiene y por ello el problema ambiental puede considerarse igual en toda la UE.

Es muy difícil, y cada día más, deslindar las diversas actividades industriales y su afección individualizada al medio. Así un automóvil antiguo y que funcione de forma deficiente es evidente que consumirá mucha energía (sector energía), producirá ruido y contaminación atmosférica (sector industrial y transporte) y generará, durante su vida y después, una gran cantidad de residuos: gran consumo de aceite, materiales difíciles de reprocesar (sector industrial y residuos).

De manera semejante a lo que acontece con los vehículos, los electrodomésticos presentan problemas ambientales en la fase de producción, de distribución, en servicio y fuera de uso. La empresa Balay, que fabrica electrodomésticos equipados con etiqueta energética de Clase A (los que menos energía consumen: pueden lograr un ahorro del 39% de energía con respecto a uno equivalente de Clase C), ha llevado a cabo un ACV sobre el impacto de un electrodoméstico en las diversas fases de su vida, tal y como reproduce la Figura 1.21.

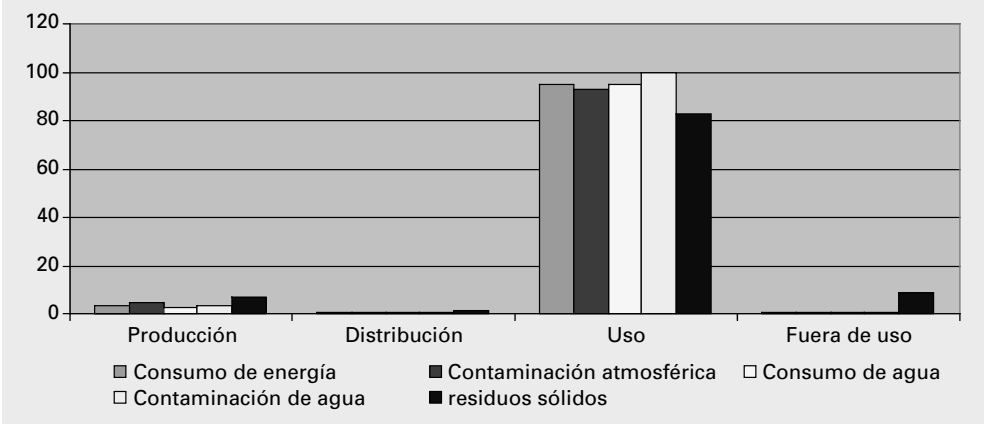


Figura 1.21. Etapas de consumo e impacto ambiental, en %, de un electrodoméstico.

En análisis concluye en que el 90% del consumo de energía y la contaminación se producen en la fase de uso o servicio del aparato.

La Tabla 1.13, extraída de recomendaciones de la Dirección General de Medio Ambiente de la UE, intenta sistematizar la problemática existente en los diversos sectores con el ánimo de intentar hallar soluciones sectoriales.

1.10.1. Resumen sobre el estado ambiental de España

La UE en su informe anual sobre el estado ambiental de la unión, dedica, como a cada país, un capítulo a España en el que se hace eco de la problemática derivada de la rápida expansión económica, la incesante urbanización que combinado con el clima y su geografía da origen, de manera destacada, a episodios de incendios, sequía y erosión. Los puntos más destacados son:

- *Emisiones de gases efecto invernadero.* Del año 1990 al 2003, las emisiones se han incrementado en un 40,6%, hasta superar las 402 millones de toneladas equivalentes de CO_2. España ocupa, tristemente, el primer lugar entre los países que incumplen el Protocolo de Kyoto referente a las emisiones.
- *Consumo de energía.* España tiene un consumo energético similar a otros países meridionales de la UE. Respecto a 1990 el consumo energético se ha incrementado en un 60%. En 2004 la intensidad energética, una de las más elevadas de la UE, fue de 171,5 tep/millón €.

Tabla 1.13. Sectores industriales e impactos ambientales

Sector	Impactos, Emisiones	Perspectivas
Transportes	— Gran productor de CO_2. — Destrucción del paisaje. — Transporte por carretera: carencia de internalización de costes. — Sector con mucha subvención directa e indirecta. — Falta de acciones comunes y coordinadas entre Estados. — Elevadas emisiones de NO_x. — Congestión.- Ruido ambiental. — Impacto ambiental: flora, fauna y espacios.	— Dificultades para reducir las emisiones de CO_2. — Aumento del tráfico. — Caída de las perspectivas en la alternativa por ferrocarril. — La internalización de costes ambivalentes encareciendo los transportes aéreo y por carretera. — Falta de estrategias sólidas para la reducción de las emisiones de NO_x.
Energía	— Emisiones de SO_x, NO_x, CO_2, lluvia ácida, efecto invernadero, destrucción de los bosques y capa de ozono. — Agotamiento de recursos no renovables.	— Contingencias políticas determinantes en el precio y, por tanto, en la estrategia de ahorro y de contaminación.
Agricultura	— Aumento de la productividad a causa de: excesiva mecanización, uso masivo de energía, fertilizantes y plaguicidas. — Monocultivos: pérdida de biodiversidad. — Contaminación de aguas continentales y subterráneas. — Erosión y empobrecimiento del suelo. — Gran consumo de agua. — Destrucción del paisaje.	— Pérdida de biodiversidad. — Incremento tendencial de fertilizantes y descenso de los rendimientos. — Aparición de efectos irreversibles. — Excedentes agrícolas, paro y cambio de actividad.
Residuos	— En la UE se producen 2.200 Mt/año. — Diferentes estrategias nacionales e internacionales. — Los costes de almacenamiento a largo plazo se disparan. — Desconocimiento exacto de las cantidades de residuos tóxicos y peligrosos. — Tratamientos poco respetuosos con el medio ambiente. — Falta de soluciones para los radioactivos. — Falta de responsabilidad del fabricante en todo el «Ciclo de vida». — Impactos: salud, ecosistemas, flora, fauna y paisaje. — Contaminación edáfica.	— Limitadas posibilidades de almacenamiento. — Única solución: Minimización, reutilización y reciclaje. — Gran incremento de los costes de tratamiento que pueden multiplicarse por 20. — Falta de soluciones para la gestión no contaminante de los residuos generados. — Creación y fomento de las «bolsas de subproductos».

- *Energía de origen renovable.* La generación eléctrica de carácter renovable media fue de 19,8% en 2004. Este valor se halla por debajo de la media de la UE, que es del 22,1%. En cuanto a la energía primaria la situación es peor ya que sólo genera el 6,3%, comparado con la media de la UE-15 que se sitúa en el 12%.
- *Residuos municipales.* En la última década los RSU han aumentado hasta situarse en la media europea. En los últimos años ha mejorado la gestión de los RSU. La gran afluencia turística complica la situación.
- *Agua potable.* El informe dice que cerca del 76% del total del consumo de agua va destinado a la agricultura. En muchas zonas del país existen fuertes tensiones por el reparto del agua. El país ha decidido emprender una campaña de instalación de desalación de agua de mar para subvenir las necesidades turísticas.
- *Agricultura.* España dedica 322.000 hectáreas de terreno al cultivo y 412.00 ha en barbecho, lo que completa un 2,9% del total del territorio, un nivel semejante al promedio de la UE.

El Centro Hadley, dependiente de la Oficina Meteorológica del Reino Unido, ha publicado en octubre de 2006 un informe en el que se muestran los resultados de simulaciones realizadas con ordenadores de extraordinaria capacidad en los que se predice que para el año 2100 hasta un tercio del planeta será desierto.

El modelo desarrollado por los científicos que trabajan en este centro está basado en el Índice Palmer de Gravedad de la Sequía (sigla inglesa: PDSI). Actualmente el PDSI de sequía moderada está en un 25% de la superficie del planeta; pero se pronostica que subirá hasta un 50% para el inicio del próximo siglo. El índice de sequía grave actualmente está en un 8% de la superficie terrestre y pasará a un 40% en el mismo plazo de tiempo; mientras que el índice de sequía extrema subirá del 3% actual al 30%.

1.10.2. El medio ambiente y los ciudadanos de la UE

El gráfico de la Figura 1.22 puede sintetizar la percepción que sobre el medio ambiente tienen los diferentes ciudadanos de la UE. Así, los países que

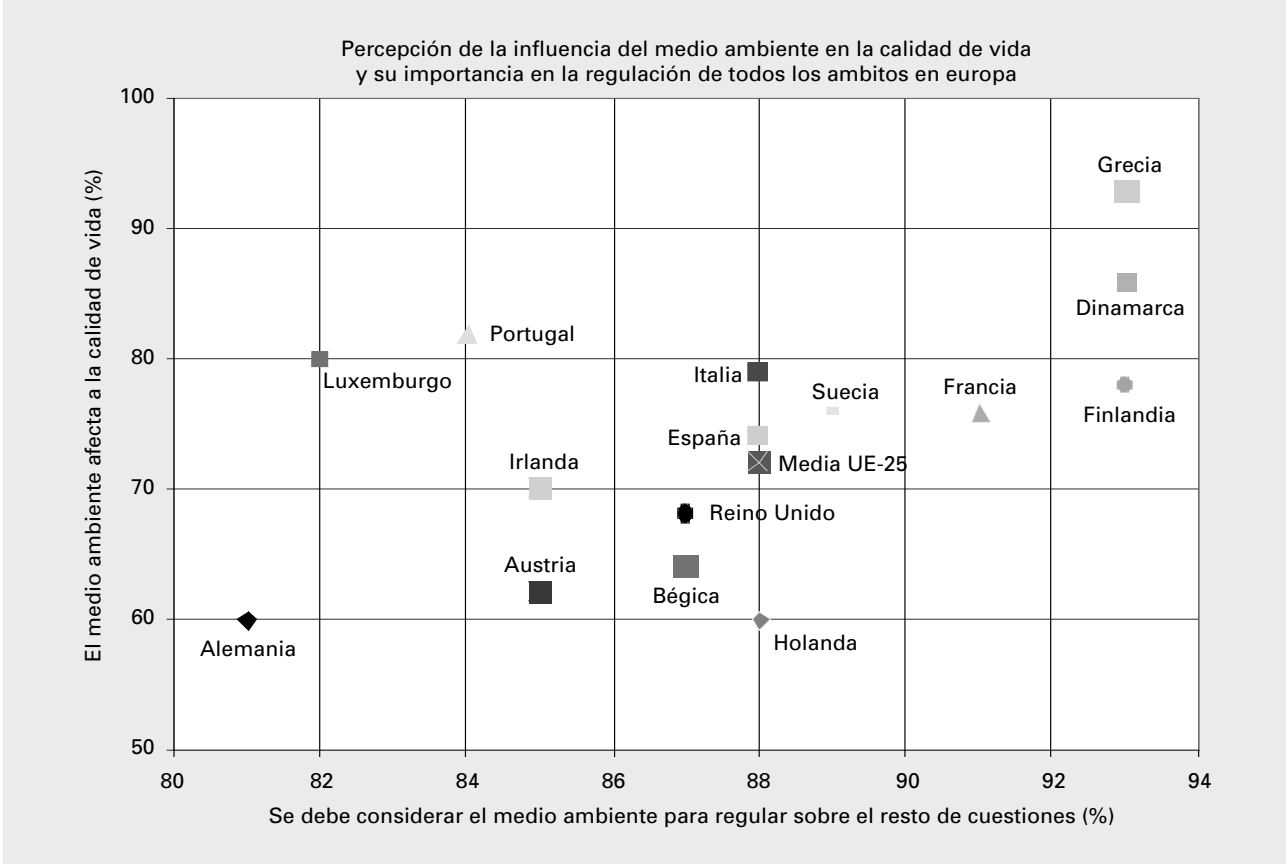


Figura 1.22. Valoración del medio ambiente por los ciudadanos de la UE.

«empezaron» antes a trabajar en los temas ambientales (Alemania, Austria, Holanda, etc.) lo tienen más asumido y no lo valoran tanto el impacto.

En cambio la percepción de que el medio ambiente ha de regular diferentes aspectos de la vida cotidiana, naturaleza, industria, tráfico, ordenación territorial, fauna, etc., es muy elevada en todos ellos. España ocupa un nivel intermedio muy próximo a la media UE-25.

En el DVD adjunto, en el punto 5, se muestran artículos de Jans-Jorc Bullinger (*Listen to the future.* Audio magazine)

1.11. NOCIÓN DE ECOLOGÍA INDUSTRIAL

La ecología industrial definida como la reproducción industrial de los procesos de la naturaleza, proporciona a los científicos grandes fuentes de investigación. Así, uno de los más expectantes es el desarrollo de proteínas extraídas de cultivos de laboratorio, para la producción de sistemas bioactivos de generación de electricidad a partir de los rayos solares. El objetivo final es la sustitución de las actuales células de silicio, con rendimientos muy bajos, por sistemas orgánicos mas baratos, eficaces y ecológicos.

El gráfico de la Figura 1.23 compara el crecimiento del Producto Interior Bruto (PIB), del orden de los 70 billones de pesetas en 1995 (valor de referencia 100 en el año 1983. 1 billón de pesetas = 6.000.000.000 €), con el incremento del mercado de los residuos (valor 100 de referencia en 1983).

Es fácil identificar que mientras el PIB ha aumentado en casi el doble en estos 12 años, la generación de residuos, y por ende el mercado de tratamiento que ello representa, se ha multiplicado casi por seis. Es obvio que esta trayectoria ascendente no podrá mantenerse indefinidamente y para ello se han desarrollado una serie de herramientas tendentes a reinsertar el residuo en la misma línea de fabricación, o en otra paralela.

Una de estas líneas es la denominada ecología industrial que, en definitiva, preconiza para los procesos productivos industriales, la imitación de los ciclos naturales. Para ello vale la pena reflexionar sobre el conocido «ciclo del carbono». Un átomo de carbono se encuentra en la atmósfera en forma de CO_2 y es asimilado por una planta por medio del proceso de fotosíntesis. Más tarde esta planta sirve de alimento a un herbívoro, pongamos por caso un conejo. El conejo es devorado por un predador que, con el tiempo muere en el bosque. El proceso de descomposición del animal, en el que intervienen activamente toda una serie de bacterias, el átomo de carbono, protagonista de nuestra historia, puede pasar un tiempo en el suelo hasta ser absorbido por las raíces de una planta, o bien ser oxidado (acción de las bacterias aeróbias) y devuelto a la atmósfera. En cualquier caso el proceso vuelve a empezar, para seguir en un eterno proceso de reciclaje.

Este átomo de carbono habrá existido en diversas formas químicas a lo largo del proceso: CO_2, molécula de azúcar, proteína, etc. Lo importante es que siempre ha sido un átomo de carbono. Traspasando la analogía al campo industrial sería válido el ejemplo que se expone a continuación.

El cromo se usa en la industria del recubrimiento de superficie para el acabado de un mueble metálico. Cuando el mueble llega al fin de su vida útil, residuo, se lleva al «punto limpio» o «punto verde», de donde va a parar a una acería. Si la acería fabrica acero para la construcción (exento de Cr), el metal se escapará con los gases en el proceso de fusión y deberá ser captado por el sistema de lavado de gases. Aquí se convierte en polvo de acería. Con un trata-

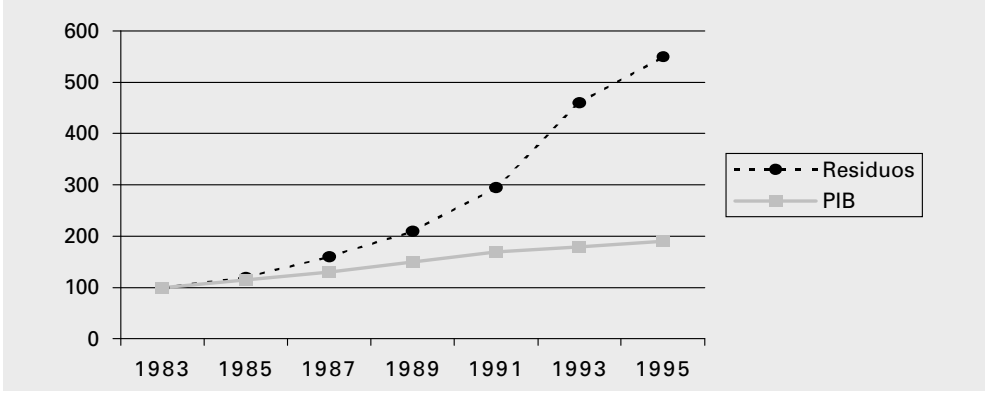


Figura 1.23. Incremento del mercado de residuos vs PIB.

miento adecuado se recupera y separa de los restantes metales y, una vez purificado, vuelve a ser Cr puro para ser usado de nuevo.

Es obvio que todos estos procesos precisan de nuevas tecnologías para que el reciclaje se lleve a cabo sin contaminación secundaria y, además el contaminante en caso de pasar a formar parte de una nueva estructura no presente peligro alguno de regresar al medio. De todas estas tecnologías es de lo que trata la presente obra.

Bibliografía

ARIZMENDI, L. J. *Instalaciones urbanas: Infraestructura y planeamiento*. Tomo I. Bellisco. Madrid.

BARCELÓ, G. *La energía en la edificación: Política energética y ahorro de energía*. Editorial Index. Madrid.

BOLEA, E. *Evaluación del impacto ambiental*. ITSEMAP. Madrid, 1984.

DÍAZ, A. y RAMOS, A. *La práctica de las estimaciones de impactos ambientales*. Fundación Conde del Valle de Salazar. ETSIM. Madrid, 1987.

DIRECCIÓ GENERAL DE QUALITAT AMBIENTAL. Les emissions a l'atmosfera a Catalunya. Una aproximació quantitativa. *Quaders de Medi Ambient*. Barcelona, 1994.

DOMENECH, X. y RIERADELALL, J. *Aprofitament energètic dels residus en abocadors*. ICAEN. Barcelona, 1995.

ELIAS, X. *La gestión de los residuos a debate interdisciplinario*. Ed. Ategrús. Bilbao, 1994.

GARCÍA, A. *Ruido de tráfico urbano e interurbano. Manual para la planificación urbana y la arquitectura*. CEOTMA/MOPU. Manual 4. Madrid, 1983.

GUÍAS MOPU. *Metodologías para la elaboración de estudios de impacto ambiental*. Ministerio Obras Públicas. Madrid.

INSTITUTO CERDÁ. *Manual de minimización de residuos y emisiones gaseosas*. Vol. I, II y III. Ed. Ingoprint, S. A. Barcelona.

INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑ . *Calidad y contaminación de aguas subterráneas en España*. Ministerio de Industria y Energía. Madrid.

JOAN-OLAF WILLUMS. From ideas to action. Cámara de Comercio Internacional. Ed. ICC Publication. ISBN 92-842-1141-7.

LAFORGA, M. *La gestión de residuos: Una necesidad que puede ser un negocio*. IMPI. Ministerio de Industria. Madrid.

LEGISLACIÓ COMUNITARIA RELATIVA AL MEDIO AMBIENTE. Vol. 6: Residuos. Dirección General XI. UE.

LEROY, J. B. *Los desechos y su tratamiento*. Fondo de Cultura Económica. México, 1987.

LÉVÊQUE , F. Dossier: los productos biotecnológicos en la prueba del mercado. *Mundo Científico*, 1990, núm. 100.

LUND HERBERT, F. *The McGraw-Hill recycling handbook*. McGraw-Hill Inc. New York.

LUYBEN, P. D. y BAILEY, J. S. Newspaper recycling: the effects of rewards and proximity of containers. *Environmental and Behavior*, 1979, vol. 10.

MBA. *Biotechnology industry*. MBA Market Information. Londres, 1989.

MCCLUSKEY, J. *El diseño de vías urbanas*. Gustavo Gili. Barcelona, 1985.

MEDIO AMBIENTE, INGENIERÍA Y EMPLEO. *Monografías de la Dirección General del Medio Ambiente*. Ed. Mopta., Madrid.

MONTOYA. E. y MURILLO. F. *Biotecnología. Perspectivas científicas*. Fundesco. Madrid, 1991.

MORENO, L *et al. Biotecnología y sociedad. Percepción y actitudes públicas*. MOPT. Madrid, 1992.

PARDINI ANTON *et al.* The effect of strength of commitent on newspaper recycling. *Journal of Environmental System*, 1983, vol. 13.

PRINZ DIETER. *Planificación y configuración urbana*. Gustavo Gili. México, 1983.

RICHARD WILLIAMS, J. *Tecnología y aplicaciones de la energía solar*. Libreria Tècnica Bellisco. Madrid, 1976.

SKINNER, B. F. *Science and human behavior*. MacMillan, Londres, 1953.

TANDY, C *et al. Paisaje urbano*. Herman Blume Editores. Barcelona, 1986.

WAGNER, T. P. *The hazardous waste Q & A*. Van Nostrand Reinhold. Amsterdam.

WHITE, P. *et al. Integrated solid waste management: a lyfecicle inventory*. Blakie Academic and Professional. Londres, 1995.

YAÑ Z , G. *La energía solar en la edificación*. Ministerio de la Vivienda. Madrid.

Clasificación y gestión de residuos. La Bolsa de Subproductos

2

Xavier Elias, Pere Fullana, Jordi Garcia, María Martín, Miquel Rigola, Marta Roca y *Josep M.ª Salas**

ÍNDICE

1. Política de tratamiento de residuos 45
1.1. Evolución en la gestión de residuos 47
1.2. Mejores Tecnologías Disponibles (MTD). 48
2. Ecoproducción: prevención en el origen y minimización de residuos 50
2.1. Gestión ambiental de los sistemas de producción 50
2.2. Etapas de desarrollo de la prevención en origen 50
2.3. Incentivos y dificultades para aplicar la reducción de la contaminación en origen 52
2.4. La prevención en los Sistemas de Gestión Ambiental (SGA): las normas ISO 1400 52
2.5. Auditorías ambientales 54
2.6. Análisis de la producción industrial 55
2.7. Aplicación en las pymes 55
2.8. La contabilidad ambiental 56
2.9. Etapas de una evaluación 57
2.10. Medida del progreso alcanzado 58
2.11. Ejemplos de aplicación de la gestión ambiental 60
3. Minimización de envases y embalajes 60
3.1. Buenas prácticas ambientales 62
3.2. Generalidades sobre la Ley de Envases 63
4. Las Bolsas de Residuos 64
4.1. Funcionamiento y resultados de la Bolsa de Subproductos de Cataluña 66
5. Reciclaje 67
5.1. Reciclaje y residuos 67
5.2. El ahorro de energía en el reciclaje 68
5.3. Los límites del reciclado 68
6. El Catálogo de Residuos 70
7. Clasificación de los residuos 72
7.1. Los residuos tóxicos y peligrosos 73
8. Introducción al Ciclo de Vida 74
8.1. Estructura y desarrollo de un ACV 75
8.2. Aplicaciones del ACV al reciclaje 80
9. Prioridades en la gestión de residuos 81
10. Vertido y Ciclo de Vida 82
11. La Agenda 21 82
11.1. El plano global: el desarrollo sostenible, un contexto para la empresa 83
11.2. Relación empresa y Agenda 21 85
11.3. Interacción Agenda 21 y empresa 85
11.4. Del plano local a la respuesta individual. 86
Bibliografía 87

* N.E.: Los autores del Capítulo se relacionan por orden alfabético de apellido.

RESUMEN

Previamente a la clasificación de los residuos, cuya variedad podría considerarse como prácticamente infinita, es conveniente llevar a cabo un repaso de los sistemas de gestión de residuos y en particular de aquellos modelos que preconiza la Unión Europea.

Para proceder a la clasificación de residuos se remite al lector al Catálogo de Residuos confeccionado por la Unión Europea, con el ánimo de armonizar, en lo posible, su nomenclatura y comprensión.

Para finalizar el presente capítulo se realiza una breve incursión a la minimización y a las posibilidades que el Análisis de Ciclo de Vida proporciona a la gestión de residuos, así como a la Agenda 21.

1. Política y tratamiento de residuos

La masiva generación de residuos está creando un importante problema a nivel global, por lo que resulta urgente hallar las soluciones adecuadas para solventarlo de la forma más sostenible posible. En la Unión Europea, a través del *V Programa de Acción en Materia de Medio Ambiente* (1992) y, en general, en el resto de los países industrializados, existió plena unanimidad en la manera de enfocar la problemática del tratamiento de los residuos. El quinto programa puede considerarse como el punto de partida de la política sobre medio ambiente, proponiendo la integración de las consideraciones medioambientales en los diferentes sectores:

- Política agraria común.
- Fomento de la conservación de la naturaleza.
- Turismo sostenible.
- Optimización del transporte, minimizando las emisiones contaminantes y mejorando la calidad del combustible, etc.

A grandes rasgos el citado programa tiene tres puntos de referencia:

a) *Minimización.* Deben fomentarse todos los procesos que supongan una reducción de la generación de residuos. Ello supone, con frecuencia, cambios en los procesos de producción, en el uso de materias primas o, simplemente, en los hábitos de fabricación. La minimización se entiende como el conjunto de acciones llevadas a cabo para disminuir la generación de residuos en los procesos productivos que los crean; esta alternativa de gestión puede considerarse como la más respetuosa con el medio ambiente.

b) *Valorización.* Una vez producido el residuo se debe recurrir a toda una serie de técnicas para su reutilización. Es la llamada vía de las tres «r»:

- **R**ecuperación de todas aquellas materias que puedan volver a emplearse.
- **R**eciclaje mediante las numerosas técnicas existentes.
- **R**eutilización, directa o indirecta, del residuo. Las Bolsas de Subproductos actúan de lleno en este bloque.

Un ejemplo típico que combina las tres «r» es el papel reciclado: se recupera el papel usado y mediante la Bolsa de Subproductos se anuncia la disponibilidad de un residuo; por fin la fábrica de papel lo procesa y lo expende en forma de papel reciclado.

Llegados a este punto es preciso hacer una observación juzgada como muy importante para la preservación del medio ambiente: parece lógico citar la *recuperación* si lo que se pretende es reaprovechar los residuos como nueva materia prima; también hablar del *reciclaje*, puesto que una vez recuperado el material hay que someterlo a una serie de operaciones, o técnicas de reciclaje, para volverlo a usar; lo que no parece tan lógico es que se haga hincapié en la *reutilización*: es obvio que se recicla para reutilizar. Sin embargo es preciso ampliar el concepto de reutilización.

Por lo general, y así lo confirman las encuestas, el reciclaje no goza de buena opinión entre la población. En muchas ocasiones el término reciclado es sinónimo de producto efímero y de baja calidad. La percepción que muestran muchos ciudadanos es que el material reciclado no tendrá las prestaciones de un material «virgen» y original, lo que resulta cierto en determinados casos, como en el ejemplo del papel, anteriormente mencionado. Técnicamente, un papel fabricado a partir de otro usado no puede tener la misma calidad que un papel hecho directamente a partir de madera. Sin embargo, es fácil estar de acuerdo en que para imprimir un periódico, que en el mejor de los casos va a tener una vida útil de pocas horas, es una barbaridad cortar un árbol, cuando lo habitual es arrojarlos al cubo de la basura con destino al vertedero.

En cambio, muy pocos piensan que al comprar un coche, más del 80% en peso de lo que se está adquiriendo procede en muchas ocasiones de productos reciclados, puesto que la mayoría de los materiales que lo integran: acero, fundición, vidrio, ciertos plásticos, no sufren merma alguna en su calidad en las operaciones de reciclado. Esto que parece tan obvio en automóviles, electrodomésticos y muchos materiales de construcción a veces se antoja inapropiado para ciertas aplicaciones. Por ello es preciso informar y formar a los ciudadanos, para que sepan valorar la reutilización, y promocionar la compra y el uso de productos reciclados. De hecho la filosofía que subyace en estas páginas es el fomento a la reutilización.

Algunos países tienden a incorporar la valorización en la minimización ya que, de hecho, es un sistema de reducir la generación de residuos.

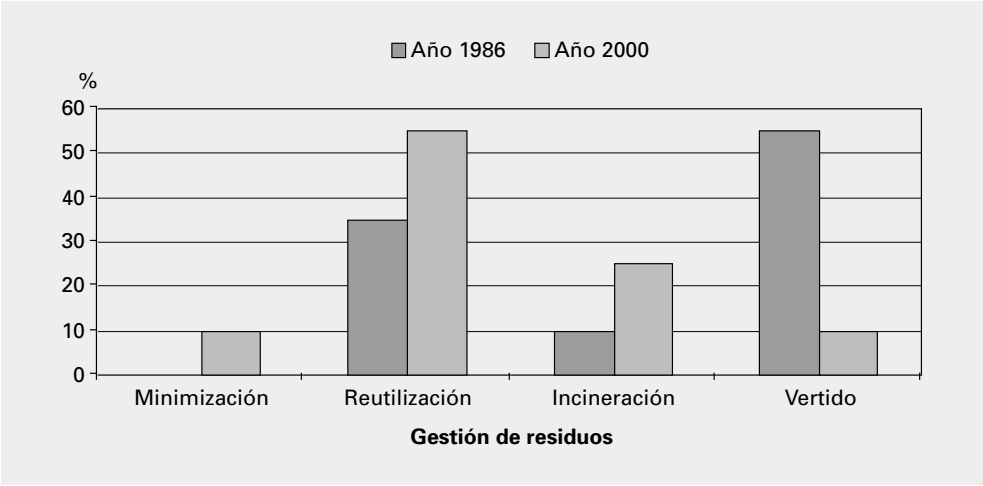


Figura 2.1. Objetivos propuestos en los Países Bajos en la política de gestión de residuos en los años 1986 y 2000.

c) *Tratamiento.* Se denomina así a todos aquellos procesos que tienen como finalidad reducir la toxicidad del residuo pero cuyo destino final es el vertedero. Así, un tratamiento fisicoquímico es un proceso de reducción del impacto del residuo como paso previo al vertedero. Otro caso es la incineración, con la que se recupera energía.

Algunos países, como Francia, definen la incineración con recuperación de energía como una operación de valorización, mientras que si no se recupera energía lo consideran un tratamiento y, en consecuencia, le aplican el trato fiscal que le corresponde. La comunidad internacional establece este orden de prioridad preconizando, si conviene, un tratamiento fiscal a favor de la valorización y la minimización y una penalización a los tratamientos, en particular al vertido extremo con el que se muestra claramente en contra. La Figura 2.1 expone los objetivos de la política medioambiental, en materia de residuos industriales, propugnada por el Ministerio de Medio Ambiente de los Países Bajos, país que por diversas razones es especialmente proclive a seguir dichas directrices.

Como es bien conocido, los Países Bajos no tienen una orografía accidentada; son esencialmente planos, lo que dificulta la búsqueda de parajes adecuados para la instalación de vertederos, puesto que éstos precisan la conjunción de valles con especiales connotaciones geológicas. Si a este factor se le suma el hecho de ser un país industrializado y con gran presión demográfica y ecologista es obvio que las directrices convencionales hayan de ser sustituidas por políticas más avanzadas que señalen a la valorización.

Conviene indicar que todas las empresas e industrias deben disponer de un procedimiento que les facilite la identificación de normativas requisitos legales que estén relacionados con sus actividades, productos o servicios. Las disposiciones legales tienen que considerar los ámbitos y áreas de actuación mostrados en la Figura 2.2.

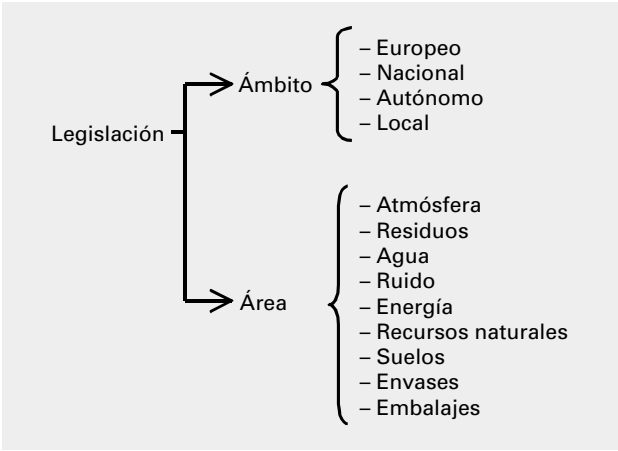


Figura 2.2. Diagrama esquemático de la evolución temporal en la gestión de residuos.

A modo de ejemplo:

- Ámbito Europeo y Área Atmósfera: Directiva del Consejo 96/62/CEE, de 21 de septiembre, sobre evolución y gestión de la calidad del aire ambiente.
- Ámbito Nacional y Área Agua: Real Decreto 484/1995, de 7 de abril, relativo a medidas de regulación y control de vertidos.
- Ámbito Local y Área Residuos: Ordenanza Municipal de limpieza pública, recogida y tratamiento de residuos.

1.1. EVOLUCIÓN EN LA GESTIÓN DE RESIDUOS

La política ambiental de la Unión Europea dio un salto cualitativo a partir de la Conferencia de Estocolmo (1972) cuando el Consejo, a propuesta de la Comisión, aprobó el Primer Programa de Acción Ambiental (1973), con el que se establecieron las medidas comunitarias de protección medioambiental, aunque sin base jurídica facultativa para proteger el medio ambiente. Todos los programas siguientes se aprobaron por un periodo de cuatro o cinco años, a excepción del Quinto que, aprobado en 1992, tuvo una vigencia hasta el año 2000, y el Sexto Programa con un periodo entre 2002 y 2012. Estos programas ambientales han señalado los principios orientadores de la política ambiental comunitaria de la Unión Europea, y diseñan su aplicación de acuerdo a los desarrollos tecnológicos y científicos del momento.

El Primer y el Segundo Programa establecieron la reducción y supresión de la contaminación como objetivos, así como la adecuada gestión de los recursos naturales del planeta, en particular aquellos más proclives al equilibrio ecológico. El Tercer Programa supuso un cambio cualitativo al apostar por la prevención de la contaminación, abordando la integración de las exigencias medioambientales con la planificación de los diferentes sectores económicos. El Cuarto Programa tenía como objetivo fundamental la incorporación de la política ambiental a las otras políticas: la industrial, la agrícola y la social. La creciente concienciación pública en los problemas ambientales obligó a la Comisión a lanzar los programas de etiquetaje ecológico y preparar los sistemas de gestión y auditoría ambiental. Estos cuatro primeros programas tienen en común el enfoque sectorial de los problemas medioambientales.

A partir de la Cumbre de Río de Janeiro sobre medio ambiente y desarrollo (1992), y la incorporación de los diversos modelos de desarrollo sostenible, surge el Quinto Programa de Acción. Para lograr un equilibrio entre los imperativos de protección ambiental y el lógico desarrollo económico, sostenible y ambientalmente aceptable, el Programa se fundamenta en los siguientes aspectos:

- Internalización de los costes ambientales.
- Irrupción de cuestiones ambientales como factores de competencia.
- Colaboración y responsabilidad compartida.
- Ampliación de la gama de instrumentos de gestión.

El Quinto Programa de Acción de la Unión Europea establece una estrategia comunitaria de gestión de residuos hasta el año 2000 basada en la jerarquización de opciones para el tratamiento de residuos mostrada en la Figura 2.3.

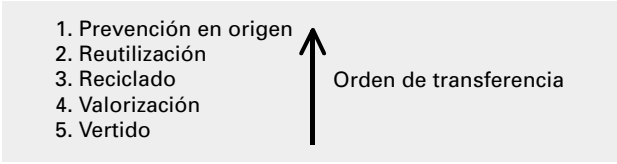


Figura 2.3. Jerarquización de las opciones de tratamiento de residuos establecida por el Quinto Programa de Acción Comunitaria.

El 22 de julio de 2002 se aprobó el Sexto Programa de Acción Comunitario para el Medio Ambiente, que abarca el periodo 2002-2012. Los objetivos de este último programa son los siguientes:

- Evitar el cambio climático.
- Protección de la naturaleza y biodiversidad.
- Medio ambiente y su relación con la calidad de vida.
- Gestión responsable de los recursos naturales y sus residuos.

En el caso de los residuos, la política comunitaria relativa a su gestión se basa en los siguientes aspectos: minimizar la generación de residuos mejorando los productos de los que provienen, fomentar el reciclaje y su reutilización, y reducir la contaminación asociada al tratamiento de residuos; es decir, la vía de las tres «r». La Unión Europea ha tomado en consideración de forma prioritaria flujos de residuos sobre los que conviene actuar; ello ha determinado la adopción de leyes sobre residuos de envases, pilas y baterías, y aceites usados, entre otros.

Es cierto que las políticas de residuos desarrolladas en los países industrializados han ido evolucionando a medida que han avanzado los conocimientos científicos y la concienciación ciudadana en temas de medio ambiente. Sin embargo, estas políticas siempre han buscado respuestas a una pregunta mal planteada: ¿qué hacer con los residuos? En un principio, las soluciones a este problema consistieron simplemente en la dispersión y dilución de los residuos al medio ambiente, estrategia que se basaba en una supuesta capacidad indefinida del entorno para asimilar cualquier tipo de contaminante. La Figura 2.4 muestra esquemáticamente cómo ha ido evolucionando con el tiempo la gestión de residuos.

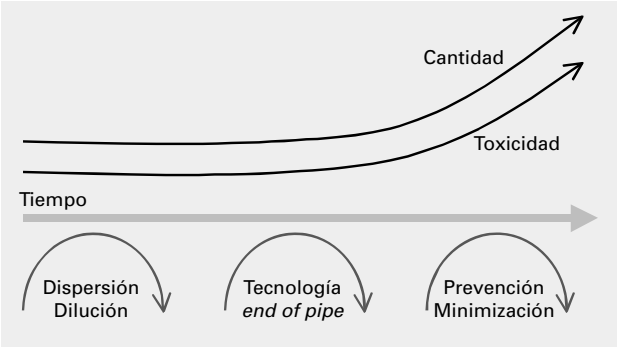


Figura 2.4. Diagrama esquemático de la evolución temporal en la gestión de residuos.

Cuando empezaron a surgir los problemas de espacio y se empezó a tener conocimiento de las características persistentes, bioacumulativas y tóxicas de los componentes de los residuos, se consideró la necesidad de controlar los contaminantes aplicando métodos *end of pipe* o de final de proceso: filtros, depuradoras de aguas residuales, vertederos, etc., y métodos de tratamiento de residuos: incineradoras, tratamientos fisicoquímicos, etc. Pese a todos estos esfuerzos, durante los últimos años el incremento de la carga contaminante en el medio está produciendo una fuerte degradación del entorno natural.

Se han detectado ciertos defectos en los programas de gestión de residuos, debidos, fundamentalmente, a las siguientes causas:

- Responden a una visión parcial del problema, por lo que no tienen en cuenta que la generación de residuos va acompañada de emisiones de sustancias tóxicas al medio, afectando directamente a los bienes de consumo, etc.
- No tienen en cuenta la complejidad de la composición de las emisiones de las industrias. Sólo unas cuantas decenas de contaminantes están regulados por las normativas; la información sobre persistencia, bioacumulación y toxicidad en el medio ambiente es muy limitada, desconociéndose los efectos sobre el medio ambiente de determinadas mezclas de sustancias.
- Trasladan los contaminantes de un medio a otro, no pudiendo evitar que tarde o temprano afecten al medio ambiente.

Otro problema asociado a la generación de residuos es el que hace referencia a sus efectos transfronterizos, debido principalmente a las diferencias en el rigor de aplicación de las normativas ambientales entre países vecinos, y a la falta de óptimos sistemas de tratamiento, por lo que parece que la solución pasa fundamentalmente por la prevención en origen. En este punto se replantea la pregunta inicial «¿qué hacer con los residuos?», convirtiéndola en «¿qué se puede hacer para no generar residuos?». Es en este punto donde encaja el concepto de minimización de residuos.

Las principales implicaciones del concepto de minimización son las siguientes:

- Evitar la dependencia de los tratamientos *end of pipe*.
- Adoptar tecnologías limpias y generadoras de pocos residuos.
- Reciclaje, recuperación o utilización de residuos en forma de combustible en aquellos procesos donde su producción sea inevitable.

La minimización de residuos no trata de reducir los residuos una vez han sido generados, sino que lo que pretende es disminuir su generación en origen. El objetivo es valorar metódicamente los procesos productivos, anticipándose a cada emisión o generación de residuos, aplicando en cada uno de los puntos del proceso de producción donde se generan residuos la siguiente lista de prácticas de reducción, por orden de preferencia:

- Optimización de procesos (gestión de balances de masa y energía).
- Tratamiento para generar residuos menos nocivos.
- Uso de los residuos para la producción de energía.
- Recuperación para reciclaje y otros usos.
- Reciclaje en el mismo proceso productivo.
- Reducción de la producción de residuos en origen.

1.2. MEJORES TECNOLOGÍAS DISPONIBLES (MTD)

Las mejores tecnologías disponibles, o *best available technologies* (BAT) en terminología anglosajona, constituyen un cuerpo de doctrina industrial perfectamente enraizado en la filosofía de toda actividad industrial puesto que propugna la adopción de aquellas tecnologías de producción disponibles en el mercado que generen menos polución de cualquier tipo a la vez que se revelan como económicamente viables. En el fondo los postulados son siempre, o casi

siempre, compatibles con los resultados: una nueva tecnología triunfa por ser más competitiva. En otras palabras, una MTD significa producir lo mismo, o de mejor calidad, con menos materia prima y menos energía, lo que automáticamente se traduce en un método más económico. De aquí se extrae el siguiente corolario: *cualquier tecnología más competitiva es más respetuosa con el medio ambiente*.

Por ejemplo, en el caso del tratamiento de lodos provenientes de una planta depuradora de aguas residuales son diversas las mejores tecnologías disponibles que podrían ser aplicables:

- *Deshidratación.* Las MTD se basan en diversas técnicas: eras de secado, filtros prensa, filtros banda y centrifugación. El desarrollo de nuevas técnicas prevé un aumento de la temperatura del fango, o un acondicionamiento térmico previo. Estos sistemas permitirán alcanzar un 28-30% de sequedad para los fangos primarios y secundarios.
- *Compostaje.* Actualmente, las técnicas de compostaje se basan en una fase inicial de secado y un compostaje al aire libre mediante apilamientos y volteos sucesivos. Estos sistemas de bajo coste económico presentan diversos inconvenientes: gran superficie de explotación, producción de olores y lixiviados, y baja aceptación social. Las MTD permiten un proceso de compostaje con un bajo coste ambiental; estas técnicas serían: apilamiento con ventilación forzada con sistemas de reducción de olores, compostaje en canales de agitación, y compostaje en túneles. Estas tecnologías pueden tratar hasta 80.000 t/año frente a las 400.000 toneladas anuales tratadas actualmente, lo que implica instalaciones de tamaño medio mejor aceptadas socialmente. Estos sistemas de compostaje son capaces de controlar mejor el proceso con una aireación óptima y menores tiempos de proceso, obteniendo, en definitiva, un compost de mejor calidad. Consideración aparte merece el tratamiento de fangos de depuradora junto con el FORSU (Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos) mediante compostaje. Las MTD están basadas en la aplicación de la biometanización y el compostaje aerobio, aunque su implantación dependerá de que la normativa legal permita la gestión conjunta de estos dos tipos de residuos.
- *Cogeneración.* La tecnología de producción de energía eléctrica está en pleno desarrollo, favoreciendo la aparición de equipos con óptimos rendimientos de trabajo. Las MTD para equipos de cogeneración permiten un rango de producción mayor con mejores condiciones técnicas y económicas, mejores rendimientos y mejor diseño de los materiales; ello implica un mayor ciclo de vida de los equipos y una reducción en los costes de mantenimiento.

Los primeros esfuerzos de la Comisión, que elaboró la Directiva del Consejo 84/360/CEE, de 28 de junio, relativa a la lucha contra la contaminación atmosférica procedente de instalaciones industriales, hicieron especial hincapié en aquellos sectores que por su propia naturaleza eran capaces de producir un serio impacto al medio ambiente:

- Incineración de residuos tóxicos y peligrosos.
- Fabricación de ácido sulfúrico, fosfórico y nítrico.
- Fabricación y manipulación de benceno y amoníaco.
- Producción de cemento y cal.
- Refinerías de crudo.
- Industria siderúrgica y metalúrgica. En particular la producción de acero en horno eléctrico y el aluminio primario.
- Industria de fertilizantes, fotoquímica y química en general, etc.

Para ello la Comisión elaboró unos estudios encaminados a poner a disposición de los industriales el estado del arte de las MTD para cada uno de los mencionados sectores. En conclusión, la Comisión propuso la adopción de aquellas MTD que fomentaran los siguientes aspectos:

- El uso de tecnologías que generen menos residuos.
- El reciclaje y la reutilización de los residuos producidos en el curso de la fabricación.
- La valoración, a la baja, de la calidad y cantidad de las emisiones contaminantes.
- La reducción de las materias primas, incluyendo agua y energía.

2. Ecoproducción: prevención en el origen y minimización de residuos

2.1. GESTIÓN AMBIENTAL DE LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

La necesidad de alcanzar un desarrollo sostenible dirige, hoy en día, la gestión ambiental de los sistemas de producción[1]. Esta gestión se realiza, en la práctica, dentro de unos límites ya que pocas tecnologías se pueden considerar absolutamente limpias y es muy difícil alcanzar la emisión cero con un costo razonable.

Ecoproducción implica la aplicación en los procesos de producción de criterios de ecoeficiencia, es decir, eficiencia ambiental y económica, que en el caso de la pequeña y mediana empresa (pyme) se ha aplicado también con la denominación del PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente) de Producción más Limpia. La ecoeficiencia en los procesos se complementa con el Ecodiseño de productos, en todos los casos bajo la perspectiva del ciclo de vida. Igualmente, como se ha explicado en apartados anteriores, para la gestión ambiental de los sistemas de producción se ha definido una clara escala jerárquica de preferencias en la vía de la sostenibilidad: reducción en origen, reciclaje interno y externo, valorización material y energética, tratamientos de las corrientes residuales y disposición controlada cuando no existe otra solución.

La gestión ambiental más general, y, como parte de ella, la reducción de los impactos, se lleva a cabo en cuatro áreas principales:

- Remediación de daños ambientales producidos a causa de sistemas de gestión propios del pasado, basados en vertidos y emisiones incontroladas, como la rehabilitación de explotaciones mineras y la limpieza de suelos contaminados por sustancias tóxicas.
- Tratamiento de contaminantes al final del proceso (*end of pipe*), que evita intervenir en los procesos, pero que se ven actualmente como una forma ineficiente, desde el punto de vista material y económico, de gestión de los recursos, aplicados cuando no es posible la mejora por vía preventiva. Los tratamientos pueden disminuir el riesgo asociado a una corriente residual, pero tienen un coste económico y en alguna medida transfieren la contaminación hacia otro medio. Por ejemplo, la limpieza de las emisiones atmosféricas se traduce en aguas residuales, los tratamientos de efluentes acuosos dejan residuos sólidos, etc.
- Prevención de la contaminación en origen aplicando metodologías de minimización y producción más limpia (P+L), y después valorizando los subproductos como materias para las que se encuentra un uso, aunque implique un tratamiento intermedio, o por su contenido energético.
- Aplicación de sistemas intrínsecamente sostenibles basados en la innovación de nuevos productos y procesos que utilicen al máximo los recursos y no produzcan más impacto residual que el asimilable por el medio ambiente.

La dinámica ambiental pretende tener que aplicar cada vez menos las actividades en las dos primeras áreas y avanzar hacia las otras dos. Los tratamientos siguen siendo parcialmente inevitables en muchos casos, haciéndose cargo de la contaminación que no se ha podido prevenir. Este capítulo se refiere esencialmente a la prevención en origen en alguna de sus formas, con la que se pueden resolver parte de los problemas ambientales con un beneficio económico, aumentando la competitividad de la empresa que lo aplica. Sin embargo, la prevención suele implicar medidas de mejora incrementales. En el futuro es de esperar que la investigación provea sistemas intrínsecamente sostenibles, aplicando cambios radicales en los procesos productivos que eviten los impactos ambientales y reduzcan los consumos de recursos por cada unidad de bien producido.

2.2. ETAPAS DE DESARROLLO DE LA PREVENCIÓN EN ORIGEN

En ausencia de una regulación ambiental los primeros esfuerzos en la minimización de corrientes residuales estaban motivados por intereses económicos. En general

[1] Aunque se vienen usando los términos sostenible y sustentable en el ámbito hispano, como consecuencia de las posibilidades que ofrece la traducción del término inglés, el autor prefiere usar el término sostenible en línea con el concepto de las versiones francesa, *durable*, y alemana, *nachhaltige*.

se pretendía recuperar sustancias valiosas incluidas en los residuos o convertir los residuos en subproductos para otras aplicaciones, aunque la insuficiencia de mercados para los subproductos y los costes de los tratamientos previos necesarios limitaban su aplicación.

Hacia la década de 1970 la preocupación en América del impacto potencial de la *Clean Water Act*, motivando programas como el *Pollution Prevention Pays*, y en Europa el *Seminario Internacional sobre Tecnologías y Producción sin Residuos* propiciado por la UNECE (Paris, 1976) activan el interés por la reducción de residuos y el reciclado, patente en diversas publicaciones[2].

En Estados Unidos, siguiendo la adopción en 1984 por el Congreso del *Hazardous and Solid Waste Amendments to RCRA*, la USEPA (United States Environmental Protection Agency) publica su *Report to Congress: Minimization of hazardous wastes*, que define la minimización de residuos como cualquier acción destinada a reducir el volumen o la toxicidad de los residuos peligrosos. Incluye, por lo tanto, no sólo la reducción de la contaminación en origen, sino también el concepto de reciclaje y tratamientos. La USEPA publicó en 1988 el *Waste minimization opportunity assessment manual*. En Canadá, el Gobierno de Ontario había publicado en 1987 su *Industrial waste audit and reduction manual.*

Considerando que, tal como se había definido oficialmente, la minimización no daba suficiente prioridad a la reducción en origen, en 1990 se aprueba la *Pollution Prevention Act*, que define la prevención de la polución como cualquier práctica que reduzca la cantidad de cualquier sustancia peligrosa o contaminante que entra en cualquier corriente residual o bien es emitida al ambiente (incluidas las emisiones fugitivas) antes de su reciclaje, tratamiento o disposición.

Desde 1977, el PNUMA, conjuntamente con la CEE, impulsó formas ambientalmente más correctas de fabricar, definidas como tecnologías de bajo o ningún residuo, posteriormente conocidas como tecnologías limpias.

Los primeros proyectos de difusión de la P+L en Europa se encuentran en un proyecto de minimización de residuos realizado en Landskrona (Suecia) en 1987 para explorar los beneficios económicos y ambientales aportados por la reducción en origen de vertidos líquidos y emisiones gaseosas. En Holanda se llevó a cabo a partir de 1988 un estudio de las mismas características denominado *PRISMA*. Las conclusiones del estudio fueron que, a corto plazo, se podía reducir la producción de residuos consiguiendo a la vez mejoras en la calidad de los productos y un aumento de la productividad. Siguiendo el éxito de *PRISMA* se organizó un proyecto europeo bajo el título *PREPARE* (*Preventive Environmental Protection Approaches in Europe*), que promueve proyectos en varios países europeos, aplicando la metodología de la producción más limpia. También se cuentan entre las primeras iniciativas la realización de una guía para la evaluación de oportunidades en los procesos industriales en la reducción de residuos por la Generalitat de Cataluña en 1991. Más tarde, recogiendo múltiples experiencias en diferentes sectores, el Centro de Iniciativas para la Producción Limpia, posteriormente con el nombre de Centro para la Empresa y el Medio Ambiente (CEMA) publicará el manual de *Diagnosis Ambiental de Oportunidades de Minimización* (DAOM).

En 1989 el PNUMA lanzó el concepto *cleaner production. La producción más limpia* se define como la forma de producción que considera todas las fases del ciclo de vida de un producto o de un proceso con el objetivo de prevenir o minimizar el riesgo para los humanos y el medio ambiente, a corto y largo plazo. Desde 1994 el programa PNUMA de la *National Cleaner Production Center* define la P+L como la aplicación continua de una estrategia ambiental preventiva integrada en procesos, productos y servicios a fin de aumentar la ecoeficiencia y reducir el riesgo para los humanos y el medio ambiente. La P+L se aplica a:

- Los procesos de producción: conservando las materias primas y la energía, eliminando materias primas tóxicas y reduciendo la cantidad y toxicidad de todas las emisiones y residuos.
- Los productos: reduciendo los impactos negativos a lo largo del ciclo de vida de un producto, desde la extracción de las materias primas hasta su disposición final.
- Los servicios: incorporando la preocupación ambiental en el diseño y suministro de servicios.

[2] Fox, R. D. Pollution Control at the Source. *Chem. Eng*. August 6, pp. 72-82 (1973).
Royston, M. G. *Pollution prevention pays.* Pergamon Press, New York (1979).
Proceedings of the International Symposium on Clean Technologies, Karlsruhe (1985).
UNEP Industry and Environment V.10, No. 4 *Low and Non-Waste Technology.* (1986).

Para la OCDE, las oportunidades para la ecoeficiencia se basan en los siguientes aspectos:

- Optimizar los procesos, reduciendo los consumos de recursos, los impactos y los costes operativos.
- Revalorizar los subproductos mediante la cooperación interempresarial para mejorar la eficiencia económica mientras se tiende al objetivo de cero residuos.
- Rediseñar los productos.
- Innovar en productos y servicios para entregar mejores diseños y funciones, así como disminuir su impacto ambiental.

Son criterios de Ecoeficiencia:

- Minimizar la intensidad material de bienes y servicios (consumidos para alcanzar una unidad de producción).
- Minimizar la intensidad energética de bienes y servicios.
- Minimizar la dispersión de compuestos tóxicos.
- Intensificar el reciclado de los materiales.
- Maximizar el uso de energías renovables.
- Alargar la durabilidad del producto.
- Aumentar la intensidad de servicio de los bienes y servicios.

La estrategia para mejorar la Ecoeficiencia incluye:

- Desarrollar objetivos e indicadores.
- Trabajar en la dirección de innovación tecnológica, modos de organización y formas de pensar.
- Monitorear los indicadores y modificar la estrategia si es necesario.
- Asegurar que los incentivos económicos sean coherentes y consistentes.
- Internalizar los costes de los daños ambientales siempre que sea posible.
- Desarrollar políticas que incluyan la planificación de usos del suelo, la educación y la innovación tecnológica.

2.3. INCENTIVOS Y DIFICULTADES PARA APLICAR LA REDUCCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN EN ORIGEN

La reducción en origen, bajo cualquiera de sus formas: minimización de residuos, prevención de la contaminación, ecoeficiencia, o producción más limpia, tiene unas ventajas para las empresas que la adoptan:

- Reduce las necesidades de tratamiento y deja capacidad disponible en las instalaciones para futuros proyectos de ampliación.
- Facilita el cumplimiento de la legislación.
- Facilita la obtención de renovaciones de los permisos de fabricación.
- Genera beneficios económicos en la explotación aumentando la competitividad.
- Mejora la imagen empresarial y las relaciones con la comunidad.
- Reduce las posibles responsabilidades civiles y penales.
- Asegura mejores condiciones de trabajo en higiene y seguridad.
- Ventajas de las compañías aseguradoras.
- Da a la empresa un valor más seguro para sus accionistas.

Sin embargo, su implantación no es tan fácil como podrían hacer prever sus ventajas. Son diversas las dificultades que suelen encontrarse:

- Falta de concienciación para buscar soluciones ambientales.
- Resistencia burocrática a introducir cambios.
- Dificultad de hacer llegar el mensaje a los altos niveles de gestión.
- Desconocimiento de la existencia de tecnologías aplicables y ventajas económicas que aportan.
- Falta de información sobre las posibilidades y ventajas aportadas.
- Tecnologías no adaptadas a los casos específicos.
- Incorrecta asignación de los costes de tratamiento o disposición final.
- Falta de recursos financieros.
- Políticas de precios o subsidios para el agua, la energía, etc.
- Desinformación sobre las ventajas que se van consiguiendo con el programa.

2.4. LA PREVENCIÓN EN LOS SISTEMAS DE GESTIÓN AMBIENTAL (SGA): LAS NORMAS ISO 14000

El sistema de gestión ambiental (SGA) es una forma sistemática y planificada de gestionar los aspectos ambientales de la empresa, que puede ser propio de una empresa o adaptado a normas internacionales. Durante la década de 1990 la incorporación de los SGA a las empresas se consiguió normalizar de forma similar a la gestión de la calidad bajo las normas ISO 9000, con la edición de un conjunto de normas internacionales de gestión ambiental, editadas por la Organización Internacional de Estandarización (ISO), agrupadas bajo la denominación ISO 14000 (Tabla 2.1).

Tabla 2.1. Serie de normas ISO 14000

Serie de normas ISO 14000 sobre gestión ambiental	
ISO 14001	Sistemas de gestión medioambiental. Especificaciones y directrices para su utilización.
ISO 14004	Sistemas de gestión medioambiental. Directrices generales sobre principios, sistemas y técnicas de soporte.
ISO 14010	Directrices para la auditoría medioambiental. Principios generales.
ISO 14011	Directrices para la auditoría medioambiental. Procedimientos de auditoría. Auditoría de los sistemas de gestión medioambiental.
ISO 14012	Directrices para la auditoría medioambiental. Criterios de cualificación para los auditores medioambientales.
ISO 14031	Gestión medioambiental. Evaluación del comportamiento medioambiental. Directrices.
ISO 14041	Gestión medioambiental. Análisis del ciclo de vida. Definición de la finalidad y el campo y análisis de inventarios.
ISO 14050	Gestión medioambiental. Vocabulario.

La Norma ISO 14001 especifica los requisitos para que un SGA capacite a una organización para formular una política y unos objetivos, teniendo en cuenta los requisitos legales y la información relativa a los impactos ambientales significativos, pero no establece criterios de actuación específicos.

El SGA implica una acción progresiva y continuada en cuatro etapas: planificar, actuar, comprobar y revisar. Como se puede observar en la Figura 2.5, el SGA suele asimilarse a la rueda de Deming: mediante una actividad cíclica mejora progresivamente el comportamiento ambiental a lo largo del tiempo. Es necesario que los objetivos que se marquen en el SGA sean tan cuantitativos como sea posible.

A continuación se especifican los aspectos fundamentales de cada una de las etapas de la rueda de Deming:

a) *Planear:*

- Documentar el proceso.
- Analizar los datos.
- Selección de un proceso.
- Establecer metas cuantitativas.
- Elaborar un Plan de Mejora.

b) *Ejecutar:*

- Aplicar el Plan de Mejora.
- Observar los progresos.
- Documentar los cambios.

c) *Comprobar:*

- Analizar los datos.
- Observación de las desviaciones respecto los objetivos.
- Detectar las limitaciones.

d) *Actuar:*

- Mejorar los aspectos débiles.
- Afianzar las fortalezas.
- Difundir las mejoras.

Una buena parte de las mejoras ambientales se consiguen simplemente aplicando un grupo elemental pero selecto de Buenas Prácticas Ambientales (BPA).

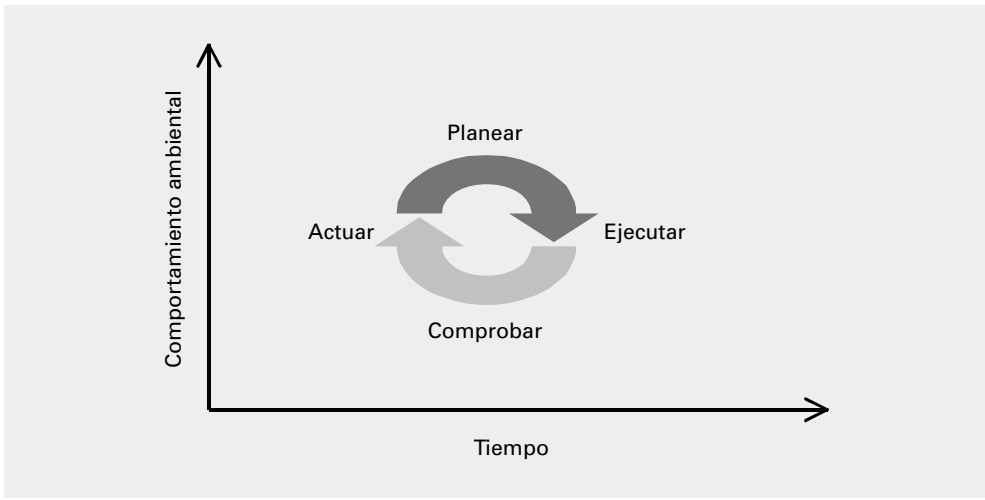


Figura 2.5. Representación esquemática de la rueda de Deming.

ETAPAS DE IMPLANTACIÓN DE LA NORMA ISO 14000

1) *Definición de la Política ambiental de la organización*

La política ambiental debe ser apoyada y aprobada al máximo nivel directivo y dada a conocer a todas las partes interesadas. Incluye un compromiso de mejora continua y de prevención de la contaminación, así como un compromiso de cumplimiento de la legislación y la reglamentación ambiental aplicable.

2) *Planificación*

Después de una revisión inicial es conveniente planificar el punto de partida y tomar decisiones sobre cómo mejorar el proceso. Sobre esta base la etapa de planificación implica establecer y mantener al día:

- Un procedimiento para identificar y evaluar los aspectos ambientales.
- Un procedimiento de requisitos legales y otros requisitos.
- Documentos objetivos y metas ambientales tomando en consideración los aspectos ambientales significativos, sus opciones tecnológicas y sus requisitos financieros, operacionales y de negocio. La política ambiental antes formulada deberá ser concretada en objetivos específicos, cuantificados en la medida que sea posible.
- Un programa para alcanzar los objetivos y las metas.

3) *Implantación y funcionamiento*

Hay que definir la estructura y responsabilidades del sistema de gestión ambiental. Es básica una comunicación fluida, así como la sensibilización y formación de todo el personal de la organización. Deben elaborarse procedimientos para mantener al día la comunicación dentro de los diferentes niveles y funciones de la organización así como recibir, documentar y responder a las comunicaciones con las posibles partes interesadas. También hay que documentar todo el sistema e identificar todas las operaciones y actividades asociadas a los aspectos ambientales significativos para establecer el correspondiente control operacional. Finalmente, hay que establecer y mantener al día planes de emergencia y capacidad de respuesta para prevenir y reducir posibles impactos ambientales que puedan estar asociados a ellos.

4) *Comprobación y acción correctora*

Una vez implantado el sistema, la organización deberá establecer mecanismos de seguimiento y medición de las operaciones y actividades que puedan tener un impacto significativo en el medio ambiente. Los procedimientos deben definir la responsabilidad y la autoridad para controlar e investigar las no conformidades así como las acciones correctoras y preventivas necesarias.

Finalmente, se deben establecer y mantener al día programas y procedimientos para que se realicen de forma periódica auditorías internas del sistema de gestión ambiental.

5) *Revisión por la dirección*

La alta dirección de la organización debe revisar el SGA a intervalos definidos, suficientes para asegurar mediante la revisión del sistema implantado, su adecuación y eficacia.

2.5. AUDITORÍAS AMBIENTALES

La auditoría medioambiental es un componente clave del SGA. Comporta una evaluación sistemática, documentada, periódica y objetiva para comprobar que la organización, la gestión y el equipamiento ambiental están funcionando correctamente y que verifica que el SGA cumple los planes establecidos para la gestión ambiental, ha sido adecuadamente implantado y mantenido, y suministra información sobre los resultados de la auditoría.

La Cámara Internacional de Comercio (ICC) tomó posición en 1989 con la edición de una guía básica para la auditoría ambiental y la definición de unos elementos esenciales. Éstos no presuponen cómo hay que hacer las cosas en las empresas, sino cómo debe hacerse la auditoría para juzgar objetivamente el comportamiento de la empresa.

Los elementos esenciales de la auditoría ambiental son los siguientes:

- Total apoyo de la dirección, demostrado de una forma abierta en todas las etapas de la auditoría.
- Objetividad del equipo auditor e independencia de los sujetos auditados.

- Competencia profesional del equipo auditor, cualificado y con suficiente experiencia.
- Procedimientos bien definidos y sistemáticos para asegurar una revisión completa y eficiente de los sujetos relevantes.
- Proceso bien documentado e informes escritos con claridad.
- Aseguramiento de la calidad de la auditoría mediante mecanismos apropiados que le den consistencia y fiabilidad.
- Seguimiento de los hechos identificados con aplicación de las medidas apropiadas.

2.6. ANÁLISIS DE LA PRODUCCIÓN INDUSTRIAL

La producción industrial tiene lugar en empresas de características muy diversas, en función del sector tecnológico al que pertenecen, su dimensión y estructura organizativa.

Los procesos modernos de producción industrial se caracterizan porque suelen encontrarse en una o más de las situaciones siguientes:

- Hacen uso de una extensa gama de materias primas.
- Las materias primas son procesadas mediante tecnologías complejas.
- Forman parte de cadenas de dependencia del tipo cliente-proveedor.
- Implican maquinarias específicas y sofisticadas.
- Tienen una división de la mano de obra vertebrada en tareas especializadas.
- Requieren una pericia diversa de los mandos intermedios y destreza del personal operario.

La implantación de un programa de prevención ambiental en origen es más fácil si se logran definir las características particulares de la empresa en los siguientes aspectos:

a) Complejidad técnica de la fabricación, en general muy relacionada con el sector industrial de que se trata. Se han propuesto hasta diez apartados para clasificar las empresas, pero es suficiente incluirlas en uno de los cuatro grupos principales:

   - Producciones unitarias o en pequeños lotes.
   - Producciones en serie o en grandes lotes.
   - Procesos de base química en discontinuo.
   - Procesos de flujo continuo.

   Si se fabrican productos diferentes, interesa conocer la distribución porcentual de los diversos productos y las secuencias de producción. Probablemente los problemas ambientales estarán concentrados en unos pocos productos o etapas de producción, que serán los que exigirán más atención.

b) Estructura de la organización: nivel de especialización, estandarización y formalización de procedimientos, descentralización de la autoridad y configuración vertical u horizontal de la organización.

c) Integración en cadenas cliente-proveedor. En los procesos modernos de fabricación tiene gran importancia evaluar el nivel de integración y dependencia de una empresa en la cadena cliente-proveedor.

2.7. APLICACIÓN EN LAS PYMES

Las grandes empresas disponen de una serie de recursos propios que les permiten incorporar la ecoeficiencia con medios internos. Ésta es una gran diferencia con la capacidad limitada de muchas pymes, que se distinguen de las grandes empresas por los siguientes aspectos:

- Falta de posición dominante en el mercado.
- Estructuras de gestión menos definidas, a menudo de propiedad familiar y gestionadas por los propietarios.
- Actúan sin apoyo de empresas participadas, lo cual suele ir unido a un acceso más difícil a la financiación y a la asistencia exterior.

Las pymes son reticentes a implantar nuevos sistemas por el temor a que interfieran en su actividad primaria de producción. Es frecuente oír excusas de los responsables de estas empresas: el personal está demasiado ocupado en otras tareas para poder dedicarlo a dar una respuesta proactiva a los requisitos ambientales, falta la información necesaria para diseñar una estrategia de cambio, los recursos financieros han de ir dirigidos a otras prioridades, etc. Tales argumentos se combinan con la percepción de que el factor ambiental sólo tiene signos negativos para la empresa.

Las empresas con percepciones negativas a la implantación de SGA pueden perder la oportunidad de hacerse más competitivas si no aplican medidas de ecoeficiencia, perdiendo competitividad en el fu-

turo. A veces, sólo la presión de un cliente principal en la cadena proveedor-cliente lleva al proveedor a implantar un SGA. La adaptación a ciertos requisitos de los clientes industriales y de los consumidores puede ser tan importante hoy en día como lo es cuando se trata de requisitos de calidad. En caso contrario, una pyme puede ser excluida del catálogo de proveedores.

Los costes crecientes de los tratamientos evidencian que la minimización de las corrientes residuales es la única posibilidad que tienen las pymes de ahorrar dinero y avanzar en el correcto comportamiento ambiental. Por otro lado, muchas pymes tienen una capacidad innovadora y una flexibilidad de adaptación a las condiciones del momento superior a la de las grandes empresas con estructuras excesivamente centralizadas. Estas pymes pueden aprovechar que la complejidad industrial requiere sistemas de producción descentralizados y flexibles capaces de adaptarse más fácilmente a las oleadas de cambios impuestos por el mercado.

2.8. LA CONTABILIDAD AMBIENTAL

Producción ecoeficiente significa tener en cuenta tanto los aspectos ambientales como los económicos en el análisis y las tomas de decisiones. A menudo, el conocimiento que se tiene de los costes ambientales es insuficiente para decidir los posibles cambios a introducir. Para demostrar los beneficios de la ecoeficiencia suele precisarse una contabilidad ambiental que permita tener un conocimiento claro de los costes ambientales que tiene la empresa en el momento presente y el origen de los mismos. La contabilidad ambiental es un proceso de identificación, recogida y análisis de la información ambiental que da apoyo objetivo a la gestión y toma de decisiones, tanto para la mejora de la gestión actual como en la planificación e implantación de nuevas medidas ambientales.

El sistema contable convencional clasifica los costes dentro de los siguientes grupos:

- Gastos directos en materias y personal.
- Costes indirectos de fabricación.
- Coste de ventas.
- Costes generales y administrativos.
- Investigación y desarrollo.

Por varios motivos, los costes ambientales pueden estar asignados a cualquiera de estas categorías en la contabilidad clásica, muy a menudo como costes generales, y ser de difícil identificación. El sistema contable clásico en general no da una visión suficiente del origen de los costes ambientales y de las cifras totales implicadas en una actividad determinada. Para poder decidir con conocimiento de causa hay que acudir a un sistema analítico de costes, aunque no siempre es necesario aplicar un esfuerzo contable adicional. Para muchas pyme's el sistema tradicional puede ser suficiente si se fabrican pocos productos diferentes, si se utilizan procesos intensivos en mano de obra, si los costes directos son mayoritarios o si se hacen cambios mínimos de producto o de proceso.

En cambio sí será conveniente pensar en la introducción de un sistema complementario al tradicional si:

- Los costes indirectos son una parte importante del coste total de fabricación.
- Los costes ambientales dentro de los costes indirectos son significativos.
- Se fabrica una gran variedad de productos en cantidades irregulares.
- Los requisitos de materias, energía, mano de obra, ocupación de equipos, etc. son muy diferentes de unos productos a otros.
- Los requisitos de calidad, controles, asistencia, etc. son muy distintos de unos clientes a otros.

Para justificar la adopción de oportunidades de mejora es necesario poner en evidencia todos los aspectos positivos y negativos de la opción que se evalúa. De hecho, pocas veces todos los costos implicados son evidentes. Un análisis en profundidad permite distinguir distintos tipos de costes que de acuerdo con sus características y evidencia pueden clasificarse como:

- *Convencionales:* son los más evidentes y fáciles de tener en cuenta. En ellos hay que tener en cuenta el menor consumo de materias primas o menor coste que pueda haber en el tratamiento o disposición de las corrientes residuales.
- *Potencialmente ocultos:* son de difícil identificación e incluyen aquellos gastos que se producen antes de iniciar la operación (diseño previo de un mejor proceso, calificación de los suministradores, etc.) y aquellos que no se han anticipado formalmente, pero que necesariamente se producirán en el futuro (cierre y seguimiento de un vertedero, etc.).

- *Contingentes:* pueden producirse en el futuro y solamente se pueden valorar junto con un cierto grado de probabilidad.
- *De imagen:* destinados a afectar la percepción de clientes y público en general para los cuales es difícil conocer los beneficios directos que producirán.

2.9. ETAPAS DE UNA EVALUACIÓN

Tanto la implantación de una evaluación simple como de un programa continuo, requiere tener una clara visión de las prioridades dentro del sistema de gestión ambiental. Así cabe preguntarse anticipadamente:

- ¿Cuáles son los objetivos perseguidos?
- ¿Cuáles son los medios humanos de que se dispone?
- ¿Cuáles son los recursos económicos que podrán dedicarse al programa?
- ¿Cómo se medirán los progresos alcanzados?

Posteriormente ha de seguirse una metódica de ejecución como la que se propone a continuación:

1. Preparación de la evaluación

- Compromiso de la alta dirección y manifestación expresa del soporte.
- Definición de los objetivos final y parciales.
- Organización del equipo auditor.

2. Revisión del proceso de fabricación

- Definir las unidades de proceso y preparar los diagramas de proceso incluyendo el tratamiento de efluentes existentes.
- Determinar las entradas de materias primas, agua y energía.
- Determinar los niveles iniciales de reciclado/reutilización.
- Determinar las corrientes con materiales peligrosos.
- Determinar las salidas del proceso:
  - Productos.
  - Subproductos.
  - Corrientes residuales.
- Corrientes residuales peligrosas.
- Identificar los destinos finales.
- Realizar una inspección sobre el terreno,
- Revisar los datos y completarlos con datos reales.

3. Preparar balances de materia y energía

- Completar los balances de materia.
- Evaluar la eficacia en el uso de materias y energía.
- Hacer análisis de exergía y ajuste termodinámico (*pinch*).
- Investigar el potencial de segregación de corrientes.

4. Identificación de oportunidades y evaluación técnica

- Identificar las opciones más obvias de minimización, producción más limpia y de reducción de riesgo.
- Identificar otras corrientes con problemas.
- Desarrollar alternativas a largo plazo.

5. Evaluación económica

- Determinar los costes actuales y anticipar los futuros.
- Realizar estudios de viabilidad.
- Determinar prioridades de ejecución.

6. Plan de acción

- Preparar un informe con conclusiones
- Diseñar un plan de acción.
- Obtener fondos.
- Implementar.
- Verificar los resultados.
- Medir el progreso.
- Reevaluar en su caso.

La evaluación económica de opciones de mejora implica agrupar todos los costes y beneficios que se espera que un proyecto genere.

Evaluación de Inversiones	Costes Operativos
• Equipos. • Equipos secundarios, piezas de recambio, etc. • Materiales. • Modificaciones en los servicios auxiliares. • Preparación del emplazamiento. • Construcción/Instalación. • Ingeniería y aprovisionamientos. • Parada y puesta en marcha. • Formación del personal. • Permisos oficiales/Certificaciones. • Capital operativo. • Contingencias. • Valor residual.	• Tratamiento y/o disposición de las corrientes residuales. • Materias primas y auxiliares, catalizadores, etc. • Transportes y almacenamiento. • Mano de obra: operación, mantenimiento, control calidad. • Servicios auxiliares. • Seguros. • Gastos institucionales. • Responsabilidades civil, penal. • Ingresos.

Período de retorno de la inversión (PRI)

$$\text{PRI} = \frac{\text{Inversión realizada}}{\text{Flujo de caja diferencial}}$$

Valor actual neto (VAN)

$$\text{VAN} = \sum_{i=0}^{n}\left[\frac{\text{Beneficios diferenciales }(i)}{(1+r)}\right] - \text{Inversión}$$

Tasa interna de rentabilidad (TIR)

$$0 = \sum_{i=0}^{n}\left[\frac{\text{Beneficios diferenciales }(i)}{(1+\text{TIR})}\right] - \text{Inversión}$$

2.10. MEDIDA DEL PROGRESO ALCANZADO

Algunas oportunidades de mejora tienen resultados inmediatos o se manifiestan a corto plazo. Otras opciones posiblemente podrán aplicarse en el futuro cuando se internalicen los costes ambientales, se apliquen criterios financieros más sensibles al desarrollo sostenible o se mejoren algunas tecnologías. Para estimular nuevas aplicaciones es importante poner de manifiesto y registrar el progreso conseguido con la aplicación de las medidas. Siempre que sea posible será preferible utilizar una forma cuantitativa de medida del progreso alcanzado. Pueden usarse valores absolutos, índices relativos, o indicadores basados en índices normalizados.

Son ejemplos de medidas absolutas utilizadas como indicadores:

- Consumo anual de energía en las distintas formas.
- Consumo anual de agua.
- Producción anual de corrientes residuales en volumen o en carga contaminante.
- Generación anual de residuos totales y/o tóxicos.

El índice más general de reducción, RI, se expresa como:

$$\text{RI} = \frac{(\text{Gb/Pb}) - (\text{Gn/Pn})}{(\text{Gb/Pb})} \cdot 100$$

donde:

- Gb: cantidad procesada o generada en el año base.
- Gn: cantidad procesada o generada en el año que se informa.
- Pb: producto producido en el año base.
- Pn: producto producido en el año que se informa.

A su vez, la relación Pn/Pb es el índice de actividad de la planta de fabricación.

Desde el punto de vista de la dirección empresarial los indicadores cumplen tres funciones principales:

- Alertan sobre aspectos de la gestión que se desvían del estado correcto.
- Informan sobre el comportamiento general y permiten planificar mejoras.
- Facilitan la comunicación interna y externa sobre la conformidad de la actividad.

La efectividad de los indicadores depende de la medida en que se consiguen los siguientes criterios:

- Cubrir aspectos significativos relacionados con la legislación ambiental y la política ambiental de la empresa.
- Ser objetivos y basados en datos disponibles y verificables.
- Ser de fácil comprensión para los usuarios.
- Responder a la preocupación de las partes interesadas.
- Permitir comparaciones.
- Ser fáciles de aplicar y obtenerse a un coste razonable.

Hoy en día, para ver la evolución del comportamiento ambiental de una empresa en algunos aspectos clave y comunicar fácilmente este comportamiento, se recomienda el uso de indicadores ambientales. En general, se adopta un conjunto, no excesivo, de indicadores que cubran los diferentes aspectos ambientales. En la Norma ISO 14001 se definen los aspectos ambientales como los elementos de las actividades, productos o servicios de una organización que pueden interaccionar con el medio ambiente. Los más significativos son:

- Emisiones atmosféricas.
- Vertidos al agua.
- Gestión de residuos.
- Contaminación del suelo.
- Uso de materias primas y recursos naturales.
- Otras cuestiones ambientales locales que afecten a la comunidad.

Estos indicadores dan información del estado presente y permiten hacer un seguimiento comparativo de las mejoras conseguidas a lo largo del tiempo. Para muchas empresas puede ser más relevante adoptar formalmente la norma de evaluación del comportamiento ambiental desarrollado en la Norma ISO 14031.

En la Figura 2.6 se muestra esquemáticamente el proceso de gestión ambiental.

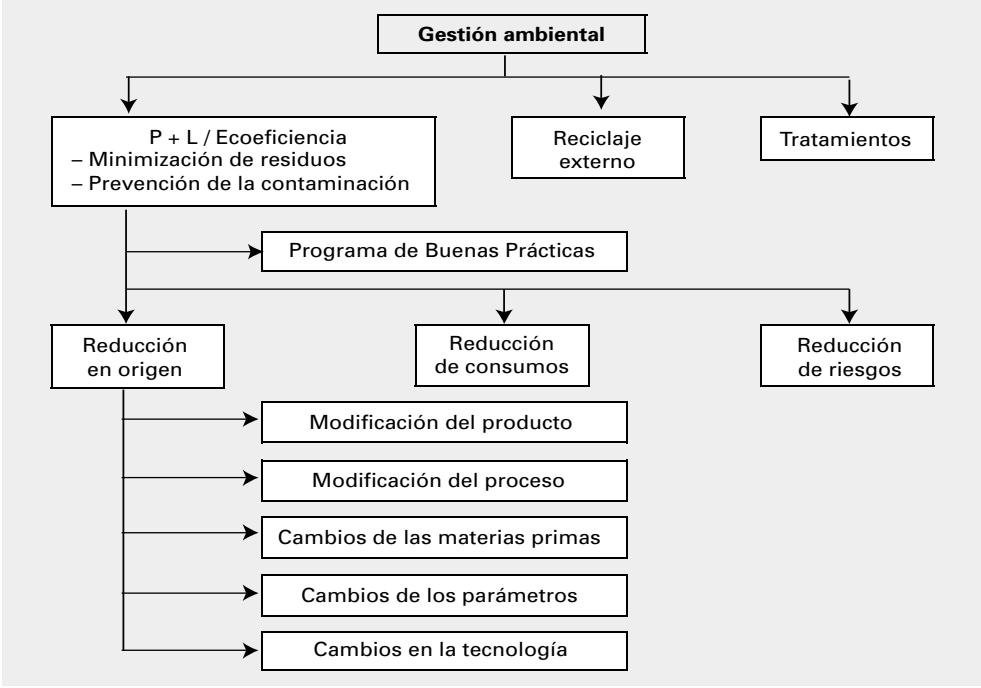


Figura 2.6. Representación esquemática del proceso de gestión medioambiental.

2.11. EJEMPLOS DE APLICACIÓN DE LA GESTIÓN AMBIENTAL

a) En compras de materiales:
   - Utilizar Hojas de Datos de Materiales con información lo más completa posible, incluyendo riesgos para el medio ambiente y operarios, y requisitos especiales de almacenaje, manejo y uso.
   - Establecer criterios de compra que reflejen las características de las Hojas de Datos y las relaciones con los proveedores
   - Devolver las muestras de productos no utilizadas …

b) Para la reducción de embalajes:
   - Usar embalajes reutilizables o reciclables, y embalajes reciclados o que incorporen materiales reciclados, etc.
   - Utilizar símbolos adecuados para el reciclaje.

c) En la gestión de inventarios:
   - Llevar un registro adecuado de existencias y movimientos.
   - Aplicar sistemas FIFO *(first in first out*, consistente en dar salida según el orden de entrada) para evitar productos caducados.
   - Almacenar en condiciones adecuadas de temperatura, humedad, etc.

d) En el almacenaje y trasvases de materias:
   - Evitar la sedimentación en depósitos como resultado de la acumulación de impurezas de mayor densidad.
   - Evitar las fugas y vertidos como consecuencia de un deficiente estado del equipo o deficiente manipulación.

e) En operación y mantenimiento:
   - Documentar los procedimientos de proceso y actualizarlos cuando sea conveniente.
   - Documentar los riesgos asociados a las operaciones.
   - Llevar un registro de fugas, derrames, respuestas aplicadas y coste de la limpieza.

f) Aplicar cambios tecnológicos:
   - Optimizar las reacciones y el uso de materias primas, agua y energía.
   - Instalar motores eléctricos de velocidad variable.
   - Instalar equipos que no producen o minimizan corrientes residuales y derrames o fugas; por ejemplo, instalar dobles sellos mecánicos.

g) Hacer cambios de materias:
   - Emplear en la alimentación materias primas de mejor calidad o pretratadas.
   - Emplear diferente catalizador.
   - Emplear disolventes acuosos en lugar de orgánicos volátiles.

3. Minimización de envases y embalajes

La Directiva 91/156/CEE del Consejo, de 18 de marzo de 1991, por la que se modifica la Directiva 75/442/CEE relativa a los residuos, indica en su artículo 3 que *los Estados miembros tomarán las medidas adecuadas para fomentar la prevención o la reducción de la producción de los residuos y de su nocividad, mediante: (a) el desarrollo de tecnologías limpias que permitan un ahorro mayor de recursos naturales; (b) el desarrollo técnico y la comercialización de productos diseñados de tal manera que no contribuyan, o contribuyan lo menos posible, por sus características de fabricación, utilización o eliminación, a incrementar la cantidad o la nocividad de los residuos y los riesgos de contaminación; (c) el desarrollo de técnicas adecuadas para la eliminación de las sustancias peligrosas contenidas en los residuos destinados a la valorización*. En otras palabras, este artículo pretende explicar que el residuo de más fácil gestión es el que nunca se genera, o el que se genera en la menor cantidad posible siendo además de baja nocividad.

En el punto 1 del DVD adjunto, y en la página web del CEMA (Centro de Empresa y Medio Ambiente) se pueden descargar las DAOM (Diagnosis Ambiental de Oportunidades de Minimización.

La minimización puede considerarse como la reducción de la cantidad y toxicidad de los residuos generados en toda actividad o proceso de producción, concepto que incluye la reducción de los recursos naturales empleados para la fabricación de un producto. Una ventaja de la minimización es el ahorro económico asociado a la eliminación de los

Figura 2.7. Ejemplos de reducción de calibre en envases habituales.

residuos generados otras ventajas de la minimización son las siguientes:

- Mejor aprovechamiento de los recursos naturales.
- Mayor rendimiento de los procesos productivos.
- Disminución de emisiones contaminantes.
- Menores presiones legislativas.

A modo de ejemplo ilustrativo de minimización, se ha seleccionado la estrategia adoptada por la industria productora de envases y embalajes. Disminuyendo su peso se da un primer paso para la reducción de los residuos. Durante los últimos años la cantidad de material que integra el elemento contenedor, ya sea plástico, vidrio o metal, se ha ido reduciendo en porcentajes importantes. Este proceso conocido como aligeramiento de peso, o reducción de calibre, ha sido desarrollado por la industria del envase y embalaje por motivos estrictamente económicos. Cuando menos material se utiliza, menor es el coste y más barata es la distribución.

Además, la legislación de diversos países obliga a la reducción del peso, centrándose casi exclusivamente en criterios de tipo medioambiental, dado que un porcentaje muy elevado de los componentes de los residuos sólidos urbanos, lo representan los envases y embalajes. El aligeramiento de peso supone un autentico reto tecnológico por cuanto ha obligado a diseñar recipientes con paredes más delgadas con la misma resistencia y prestaciones, o bien debe acudirse a la búsqueda de nuevos materiales. La Figura 2.7 muestra gráficamente algún ejemplo de lo explicado anteriormente.

La Tabla 2.2 expone un resumen de las principales ventajas e inconvenientes de algunos de los recipientes más habituales para la recogida de RSU.

Tabla 2.2. Ventajas e inconvenientes de diversos envases habituales

Tipo de recipiente	Ventajas	Desventajas
Bolsas de plástico	– Fáciles de recoger. – Artículo habitual en comercios. – No requiere un equipo especial de recogida.	– Requiere de equipo rompebolsas. – Olores en plantas de compostaje.
Bolsas de papel	– Fáciles de recoger y compostar. – Menor necesidad de equipo rompebolsas. – No requiere un equipo especial de recogida.	– Pueden romperse fácilmente. – Artículo habitual en comercios.
Cubos con ruedas	– Menor necesidad de equipo rompebolsas. – Reducción de olor en cubos ventilados. – Menor fatiga de los operarios. – Permiten recogida cada dos semanas.	– Capacidad limitada. – Necesidad de inversión por municipios. – Aparición de olores y vectores contaminantes si no se limpian adecuadamente. – Requiere un equipo especial de recogida.
Bolsas biodegradables de polímeros	– Fáciles de recoger. – Menor necesidad de equipo rompebolsas. – No requiere un equipo especial de recogida.	– Artículo habitual en comercios. – Degradabilidad cuestionable en algunos casos.
Cubos rígidos de plástico o metal	– Artículo habitual en comercios. – Menor necesidad de equipo rompebolsas. – No requiere un equipo especial de recogida.	– Capacidad limitada. – Necesidad de inversión por municipios. – Aparición de olores y vectores contaminantes si no se limpian adecuadamente.

3.1. BUENAS PRÁCTICAS AMBIENTALES

La implementación de sistemas de minimización en la generación de residuos y emisiones contaminantes muchas veces lleva implícita una modificación técnica de los procesos productivos, mediante la sustitución de materiales y cambios en el diseño de nuevos productos. La posibilidad de disminuir los impactos medioambientales se realiza a través de la aplicación de las buenas prácticas medioambientales.

Los manuales de buenas prácticas recogen los procedimientos destinados a evitar la formación de residuos generados en un proceso productivo, disminuyendo los impactos ambientales sobre el medio. Las buenas prácticas son adecuadas por su simplicidad y bajo coste, y por los rápidos resultados obtenidos sin afectar en los procesos productivos. Estos manuales recogen una serie de medidas fáciles de aplicar sin aumentar considerablemente el coste económico. Implantando las buenas prácticas medioambientales en cualquier sector industrial se consiguen resultados inmediatos:

- Reducir el consumo de agua y de recursos energéticos.
- Disminuir la cantidad de residuos generados.
- Disminuir la contaminación atmosférica y acústica.
- Aumentar la capacidad competitiva de las empresas.
- Mejorar la imagen social de las empresas.

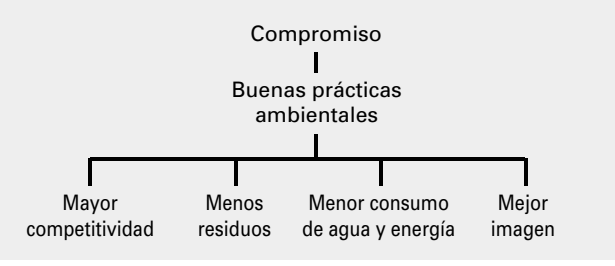


Figura 2.8. Resultados obtenidos mediante la aplicación de las buenas prácticas ambientales.

A continuación se muestran algunos ejemplos de buenas prácticas aplicadas en diferentes sectores.

3.1.1. Buenas prácticas ambientales en la industria del mueble

En este tipo de industria los residuos generados están formados por los restos de materiales manipulados a los largo del proceso de producción: polvo, serrín, virutas, productos químicos, envases y embalajes, etc. Algunos de los residuos generados pueden valorizarse mediante su reutilización en la fabricación de pasta de papel; otra opción en la valorización energética en instalaciones adecuadas.

Son diversos los residuos asociados a cada una de las etapas del proceso productivo, desde la recepción de materias primas hasta el montaje de los artículos fabricados. A continuación se muestran los residuos generados en cada etapa:

- Recepción de materias primas: materiales caducados, vertido de productos químicos, desprendimiento de gases, etc.
- Preparación y mecanizado: restos de madera, polvo, virutas, etc.
- Montaje: aguas residuales, envases y embalajes, desechos, etc.
- Barnizado: aguas residuales, envases y embalajes, etc.

Las buenas prácticas ambientales deben implantarse igualmente en cada una de las etapas del proceso:

- Recepción de materias primas: almacenar correctamente los productos químicos, etiquetar las sustancias peligrosas, revisar periódicamente los depósitos de almacenamiento de sustancias químicas, cerrar herméticamente bidones y envases, reutilizar los disolventes siempre que las condiciones y su composición lo permitan, etc.
- Preparación y mecanizado: recuperar el material no utilizado en la fabricación, entregar restos de material a empresas recuperadoras, implantar sistemas de recogida de residuos, etc.
- Montaje: no depositar en contenedores municipales los residuos sólidos procedentes de procesos de encolado, tratar adecuadamente las aguas residuales antes de su vertido, etc.
- Barnizado: gestionar los envases como residuos tóxicos y peligrosos, consumir completamente el contenido de los envases, evitar el derrame de barniz en agua (cada litro de barniz contamina una superficie de 1.250 m^2 de agua), emplear pinturas en polvo por su bajo contenido en compuestos orgánicos volátiles, etc.

3.1.2. Buenas prácticas ambientales en la industria textil

En este tipo de industria es diversa la tipología de residuos que pueden generarse: fibras textiles, materias grasas, productos químicos, residuos sólidos, tintes,

etc. En los procesos de acabados textiles muchos de los productos son no valorizables debido a sus transformaciones irreversibles durante su utilización, por lo que suelen aplicarse tratamientos de gestión destructivos. A continuación se muestran los residuos generados en cada etapa del proceso de fabricación:

- Recepción y almacenamiento de materias primas: material de rechazo, vertido de productos químicos, etc.
- Hilado: aguas residuales, residuos sólidos, etc.
- Tintado: material de rechazo, aguas residuales, fugas y derrames, envases, etc.
- Secado: consumo excesivo de energía.
- Confección y acabado: retales sobrantes, envases y embalajes, etc.

Las buenas prácticas a aplicar en cada una de las etapas son las siguientes:

- Recepción y almacenamiento de materias primas: asegurar el estado correcto de las materia primas, almacenaje óptimo de los envases, revisión periódica de los envases y contenedores, etc.
- Hilado: evitar el consumo excesivo de agua, agotar completamente el contenido de los envases, emplear lubricantes no nocivos, dosificación correcta de los productos químicos, implantar sistemas de filtrado con membranas para la recirculación del agua de lavado, etc.
- Tintado: evitar consumo excesivo de agua en los baños de tintado, aplicar los tintes desde los más claros a los más oscuros, evitar retintados de tejidos clasificándolos como de menor calidad, emplear tintes inocuos, etc.
- Secado: controlar la temperatura de la corriente de secado evitando un consumo excesivo de energía.
- Confección y acabado: ajustar los patrones de las piezas, aprovechar los retales, no quemar los productos rechazados, etc.

3.1.3. Buenas prácticas ambientales en la industria cerámica

En la industria cerámica los impactos ambientales asociados no se deben tanto a la toxicidad de sus emisiones atmosféricas, sino al elevado volumen de residuos generados. Entre dichos residuos destacan: residuos sólidos (cascotes), productos químicos inorgánicos, envases y embalajes, etc.

Los residuos químicos generados en cada etapa del proceso industrial se señalan a continuación:

- Recepción y almacenamiento de materias primas: envases, vertido de sustancias químicas, etc.
- Conformación de las piezas: emisión de polvo, aguas residuales, envases, etc.
- Embalaje y almacenamiento: material rechazado, envases y embalajes, etc.

Las buenas prácticas que deben aplicarse en cada una de las etapas del proceso de fabricación son las siguientes:

- Recepción y almacenamiento de materias primas: comprar materias primas en depósitos de gran volumen, comprobar el correcto estado de las materias primas, etiquetar los envases, emplear envases fabricados con materiales reciclables, cerrar adecuadamente los silos de almacenamiento, etc.
- Conformación de las piezas: emplear filtros en los procesos de producción, reciclar los moldes, instalar sistemas de destilación para recuperar los disolventes, reutilizar los productos de inferior calidad, vaciar y escurrir completamente los envases, revisar periódicamente los equipos para reducir el consumo de energía, etc.
- Embalaje y almacenamiento: reducir el número de envoltorios al envasar un producto, almacenar adecuadamente los productos, recuperar los envases reutilizables, etc.

3.2. GENERALIDADES SOBRE LA LEY DE ENVASES Y EMBALAJES

La Directiva 94/62/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 20 de diciembre de 1994, relativa a la gestión de envases y de residuos de envases y embalajes no es, en rigor, una ley medioambiental ya que, tanto por su origen, deriva de una ley de comercio y transporte, como por la cantidad y calidad de los agentes económicos implicados obedece tanto a razones comerciales como ambientales. Esta Directiva tiene el objetivo de armonizar las medidas nacionales sobre gestión de envases y residuos de envases para prevenir o reducir sus impactos sobre el medio ambiente. El ámbito de aplicación son todos los envases que se ponen en el mercado de la Unión Europea, independientemente de su origen, del lugar de uso o del material del que estén hechos. Envase es todo producto fabricado con cualquier material de

cualquier naturaleza que se utilice para contener, proteger, manipular, distribuir y presentar mercancías, desde materias primas hasta artículos acabados, y desde el fabricante hasta el usuario o el consumidor. Se consideran también envases todos los artículos desechables utilizados con este mismo fin. La Unión Europea genera envases y embalajes en sus distintos Estados miembros y, debido a las leyes de libre circulación de mercancías, los materiales pueden devenir residuos en un estado diferente al que se envasó. Ello ha obligado a realizar unas leyes de carácter armonizador que necesariamente han de conjugar los aspectos comerciales y económicos con las crecientes prioridades de carácter ambiental.

Esta dualidad entre comercio y medio ambiente atrapa a la ley en ciertas contradicciones como cuando afirma que los envases no podrán ir al vertedero y prohíbe la inscripción de desechable en el envase (aspecto ambiental) mientras que pone un techo del 65% a la cantidad de envases a recuperar (concesión comercial). La ley española obliga a aplicar el sistema de devolución y retorno: este sistema consiste en que los envasadores ponen los productos en el mercado y éste los vende al consumidor final; una vez se ha generado el residuo se devuelven al comerciante, que retorna el envase vacío al envasador cobrando una cierta cantidad. Se trata de un sistema poco ágil en el que el cupo de retorno de envases lo fija el Ministerio de Medio Ambiente (aspecto ambiental) mientras que permite que los diversos agentes: envasadores, importadores y comercializadores, se acojan voluntariamente a uno de los sistemas de gestión integrado (concesión comercial). Esta alternativa podría tener una lectura en clave de pago por servicio prestado sin tener en cuenta el espíritu de la ley: «pago el punto verde y abandono el envase, que para eso está el sistema de gestión».

La Ley 10/98, de 21 de abril, de Residuos, que transpone la Directiva 91/156/CEE, donde se define lo que se considera por residuo urbano y se regulan las competencias en materia de recogida y tratamiento de residuos, establece en su Artículo 5 que *la Administración General del estado elaborará diferentes Planes Nacionales de Residuos, mediante la integración de los respectivos Planes Autonómicos, en los que se fijarán los objetivos específicos de reducción, reutilización, reciclado y otras formas de valorización y eliminación de residuos*.

La ley española preconiza la aplicación de los análisis de ciclo de vida como herramientas para dilucidar la bondad ecológica de un determinado tipo de envase o embalaje. Además la legislación española introduce algunas mejoras de indudable valor ambiental en la trascripción de la directiva, como la reducción en el peso de los envases (aspecto ambiental), aunque se muestra ambigua en la fijación de los límites temporales de cuándo empieza a contar la reducción.

La ley es extensiva a todo tipo de envases, ya sean de postconsumo como industriales y distingue entre:

- Envase primario: se halla en contacto directo con el producto.
- Envase secundario: protege o engloba las unidades simples del producto.
- Envase terciario: preciso para el transporte.

En España, y a principios de la década de 1990, el precio del punto verde establecido supuso un incremento de cerca de un céntimo de Euro por envase. Aunque tal incremento no representó una medida disuasoria para reducir el consumo de envases. Por otro lado, la cifra de 60 céntimos de €, muy alejada de los 12-18 céntimos de € del homónimo alemán «Die Grüen punk», parecía una cantidad muy reducida para afrontar una gestión correcta sobre los envases. Si a todo ello se le añadía el hábito poco arraigado del reciclado y las lagunas legales, es fácil suponer que en el mercado aparecerán una gran cantidad de residuos de envase y que será preciso echar mano de todas las tecnologías para acometer su valorización.

4. Las Bolsas de Residuos

En todos los países industrializados existe una o varias Bolsas de Residuos. Su razón de existencia responde a la política general de gestión de residuos en la que se preconiza la valorización, una vez agotada la vía de la reducción, como objetivo para la gestión. Por tanto, las Bolsas de Residuos forman parte de las tres «r» y, concretamente, en la faceta de recuperación y reutilización.

En España, a partir de la aprobación del Plan Cameral de Medio Ambiente (1988), el Consejo Supe-

rior de Cámaras de Comercio, Industria y Navegación inició una nueva actividad de ámbito medioambiental. Para el desarrollo de este Plan, muchas Cámaras españolas crearon un Departamento de Medio Ambiente con el objetivo de dar un apoyo a todas las empresas. Estos trabajos, coordinados a través de la Comisión de Medio Ambiente del Consejo Superior de Cámaras de Comercio, Industria y Navegación de España, pretendían facilitar a todas las empresas el cumplimiento de la normativa comunitaria. Uno de los objetivos del Plan Cameral fue el desarrollo de las Bolsas de Subproductos, pudiendo operar en diversas Comunidades Autónomas, como Andalucía, Cataluña, Canarias y Galicia, entre otras. Las Bolsas de Subproductos son un medio de comunicación entre empresas, facilitando el intercambio de los residuos producidos en una empresa y que, en ocasiones, pueden ser utilizados por otra como materia prima secundaria en sus procesos de fabricación.

Las Bolsas de Subproductos son unos organismos muy eficaces que propugnan la reducción y el aprovechamiento óptimo de los residuos generados en otros procesos de producción, lo que implica un beneficio económico y empresarial a partir de la transformación de residuos en materias primas secundarias: se reducen los costes de tratamiento de residuos y a la vez se generan beneficios. Esta actividad se enmarca en la filosofía medioambiental comunitaria, aconsejando fomentar el reciclaje y la reutilización de residuos, es decir, la aplicación de la vía de las tres «r».

En esencia, el objetivo de las Bolsas es dar a conocer una publicación en la que aparezcan ofertas de residuos de empresas que se quieran deshacer de ellos y demandas en la misma dirección. Las Bolsas ponen en contacto ambos anuncios con el propósito de que se pueda aprovechar el residuo y este no termine en un vertedero. Para la inserción de anuncios los residuos son clasificados en categorías, cuyo número es variable según el perfil industrial donde se halle ubicada la Bolsa de Subproductos. En general, son habituales las tipologías de residuos que minimicen su manipulación y faciliten de esta manera el intercambio y su uso inmediato:

- Plásticos.
- Papel.
- Textil.
- Vidrio.
- Madera.
- Envases.

La gestión de las Bolsas de Subproductos varía según las regiones y los países. Así, en el caso de Cataluña la titularidad de la Bolsa de Subproductos (BSC) la ostenta el Consell de Cambres de Comerç y el Departament de Medi Ambient. Aunque en general son las Cámaras de Comercio las que tutelan la gestión de las Bolsas de Residuos.

Las Bolsas de Subproductos podrían agruparse en dos grandes grupos:

- Bolsas pasivas, realizan una publicación con una periodicidad determinada.
- Bolsas activas, que, además de lo anterior, propugnan programas y sistemas de reciclaje de residuos.

Entrando más detalladamente en su funcionamiento, las diversas Bolsas de Residuos editan un boletín donde se hallan expuestas las ofertas y demandas de residuos. En el caso de la BSC los residuos se agrupan en diversos apartados, tal y como se indica en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Agrupación de residuos según su tipología de acuerdo a la BSC.

Referencia	Tipología de los residuos
1	Químicos
2	Plásticos
3	Metálicos
4	Papel y carbón
5	Madera
6	Textil
7	Goma y cáucho
8	Vidrio
9	Cuero y pieles
10	Escombros y minería
11	Animales y vegetales
12	Combustibles y productos petrolíferos
13	Chatarra y escoria
14	Varios
15	Envases y embalajes

En cuanto a los boletines, la BSC los edita con carácter periódico, y cuenta con unos 4.000 suscriptores que reciben el citado boletín dentro de la revista *Subproductes*®. Desde principios del año 1998 también aparece en internet. En cada uno de los apartados indicados en la Tabla 2.3 se exponen los residuos en las secciones de ofertas y demandas (en

Tabla 2.4. Formato de la BSC

Material	Composición	Cantidad generada	Presentación
Tolueno y xileno	Tolueno 65% Xileno 35%	2.000 l/mes	Bidones
Hexano	Estado puro	2.000-4.500 l/año	A convenir
Solución de sulfito sódico	Na_2SO_3 19%	20 t/mes	Contenedores
Ácido acético	Ácido acético 59% Agua 41%	4.000 l/mes	Bidones / a convenir
Dimetil formamida	DMF 54% Agua 42% Metanol 4%	30.000 l/mes	Cisterna

el caso de la BSC los anuncios corresponden a un 75% de ofertas y a un 25% de demandas). La descripción, tal y como muestra la Tabla 2.4, abarca los siguientes conceptos:

- Codificación (el anunciante permanece en el anonimato).
- Tipo de material (residuo) ofertado o demandado.
- Composición más destacable del residuo.
- Producción (sistema de fabricación que ha originado el residuo).
- Cantidad de residuo y su frecuencia.
- Presentación del residuo (modo de expedición).

4.1. FUNCIONAMIENTO Y RESULTADOS DE LA BOLSA DE SUBPRODUCTOS DE CATALUÑA

En 1990 se creó la Bolsa de Subproductos de Cataluña (BSC) a instancias de las trece cámaras de comercio que integran el Consejo de Cámaras Oficiales de Comercio, Industria y Navegación de Cataluña. En 1991, la Ley 2/91, de 18 de marzo, de medidas urgentes para la reducción y la gestión de residuos industriales, encomendó a la Junta de Residuos (actual Agencia Catalana de residuos) la creación de una bolsa de gestión de residuos. Esta coincidencia condujo a que en diciembre de 1991 la Junta de Residuos y las cámaras catalanas firmaran un convenio para el desarrollo de una herramienta que potenciara la reutilización de los residuos: la Bolsa de Subproductos. El Consejo de Cámaras de Cataluña y la Junta de Residuos se encargan conjuntamente de la financiación y supervisión de las actividades de la Bolsa.

El funcionamiento de la BSC se rige por los estatutos redactados en 1992. Se trata de un servicio gratuito, abierto a todas las empresas y confidencial: los anuncios de ofertas y demandas que aparecen en la BSC están codificados de modo que en ningún caso puede producirse acceso público a los datos de las empresas que han insertado el anuncio. Además, esta codificación está homologada con las otras bolsas de subproductos que existen en España y la Unión Europea. La BSC pone límites, de acuerdo con el principio de territorialidad expresado en el Quinto Programa Europeo de Gestión de Residuos, y dado que en España hay otras cinco Bolsas de Residuos, a la inserción de anuncios de residuos que son producidos por empresas en Cataluña.

Desde el año 1995 las cifras y destino de los residuos declarados como subproductos aparecen en la declaración oficial de residuos que todos los productores de residuos están obligados a hacer anualmente ante el Departamento de Medio Ambiente de la Generalitat de Catalunya. Así se dispone, de forma exacta y real, a partir de la cifra de residuos generada y de la gestionada como subproducto. En el gráfico de la Figura 2.9 (extraídos de la memoria oficial de l'Agencia de Residus de Catalunya) aparece el volumen, en toneladas, de residuos industriales producidos en Cataluña y la cantidad, también en toneladas de los que han sido gestionados como subproductos. En promedio, la cantidad de residuos gestionada como subproducto se aproxima al 18% total, con tendencia al alza.

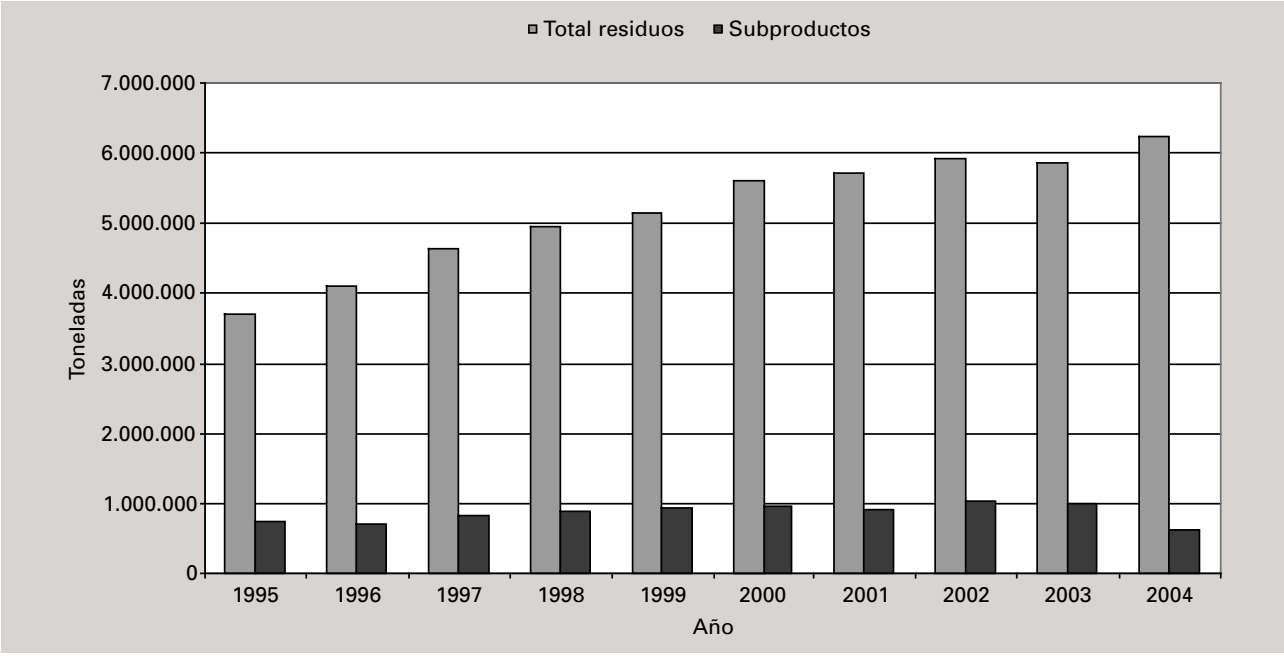


Figura 2.9. Cantidad de residuos gestionados como subproductos.

5. Reciclaje

El reciclaje se entiende como la operación compleja que permite la recuperación, transformación y elaboración de un material a partir de residuos, ya sea total o parcial en la composición definitiva.

5.1. RECICLAJE Y RESIDUOS

Los términos recogida, recuperación, reutilización, valorización, etc., responden a diversas actividades que pueden llevarse a cabo sobre los diferentes flujos de residuos para aprovechar total o parcialmente el material, ya sea para el mismo uso o para otra aplicación. El concepto más general de reciclaje consiste en hallar el medio para sacar algún provecho del residuo.

Sin embargo, dentro de los vectores contaminantes más característicos: agua, aire y residuos, el primero deviene residuo en forma más o menos sólida una vez han sido sometidos a procesos de depuración en las plantas de tratamiento de aguas residuales. Paradójicamente, podría decirse que a medida que más se depura, más se incrementa la cantidad de residuos sólidos generados.

En el proceso de filtración y lavado de gases se producen polvos, cenizas y lodos. Paralelamente, las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) cuando separan la polución contenida en el agua, generan fangos cuyo contenido en materia seca suele ser alrededor de un 35-40%. Aplicando una enérgica deshidratación mecánica (filtro-prensa), esta elevada humedad se puede reducir puesto que supone un coste importante para el transporte del fango, por lo que en algunas EDAR de tamaño importante se están implantando sistemas de cogeneración para secar dicho fango y obtener energía eléctrica tanto para la propia planta depuradora como para vender a terceros.

En definitiva, partiendo de la base de que los efluentes líquidos y gaseosos no pueden verterse sin depurar, el resultado de una actividad respetuosa con el medio ambiente es un incremento en la generación de residuos. Sumando esta fracción frecuentemente olvidada a los residuos propiamente dichos se comprende que la cantidad total sea muy importante. De ahí la necesidad de priorizar su minimización, para después afrontar los retos de la reutilización y el reciclaje.

El presente libro trata de la transformación de residuos en materiales que sean nuevamente útiles, bien en construcción o en cualquier otro tipo de ac-

tividad, empleando técnicas respetuosas con el medio ambiente. En principio, la gran mayoría de los residuos generados son susceptibles de ser reciclados ya que hoy en día se dispone de abundante tecnología para ello, tratando de ajustarse lo más idóneamente posible a cada proceso para propiciar una valorización económicamente viable.

Se abordará la valorización de la mayoría de flujos residuales, haciendo especial hincapié en los residuos industriales, que aunque su peso específico a nivel global tan sólo supera ligeramente el 5% del total, su impacto suele ser importante, y los residuos asimilados a urbanos por su gran proximidad al ciudadano.

5.2. EL AHORRO DE ENERGÍA EN EL RECICLAJE

Durante el proceso de reciclaje hay dos factores que adquieren una relevancia especial. El primero consiste en la logística de recogida de los residuos desde los diversos centros de producción hasta la planta de reciclaje centralizada. Con frecuencia el coste es tan elevado que puede hacer inviable el reciclaje; ello es frecuente en residuos de poco valor. El segundo factor es la energía asociada al proceso de reciclado.

La Figura 2.10 muestra dos ejemplos extremos. El primero compara el gasto energético que se precisa para la obtención de vidrio para botellería a partir de materias primas naturales, respecto a la fabricación del mismo producto a partir de cascote de vidrio. Como puede observarse el ahorro es del 26% (en el caso del papel reciclado el ahorro energético es de un 28%). El segundo ejemplo compara el proceso de fabricación de aluminio a partir de bauxitas, donde el mayor consumo procede de la etapa de refino electroquímico, con respecto a la obtención del mismo producto a partir de chatarra de aluminio. En este caso el ahorro de energía se acerca al 90%; ello repercute lógicamente en la viabilidad del reciclado.

5.3. LOS LÍMITES DEL RECICLADO

El reciclado de los componentes de los residuos consiste básicamente en su recuperación y posterior reintroducción en los procesos industriales y económicos. El reciclado propiamente dicho tiene dos tipos de límites: el ecológico y el económico.

El ecológico es difícil de delimitar. Puede suponerse el ejemplo de la recogida de envases de latas de conserva de acero; la recuperación es francamente fácil, ya que tratándose de un material magnético un sencillo electroimán resuelve el problema. La dificultad comienza en la operación de limpieza que debe llevarse a cabo antes de entregar la chatarra a la fundición: el agua de limpieza hay que depurarla antes de su vertido; posteriormente el envase se debe desestañar antes de su procesamiento. La operación de desestañado se realiza electrolíticamente y genera importantes residuos. Sería necesario realizar un análisis de ciclo de vida (ACV) para saber si contamina más el reciclado de la lata o su deposición en un

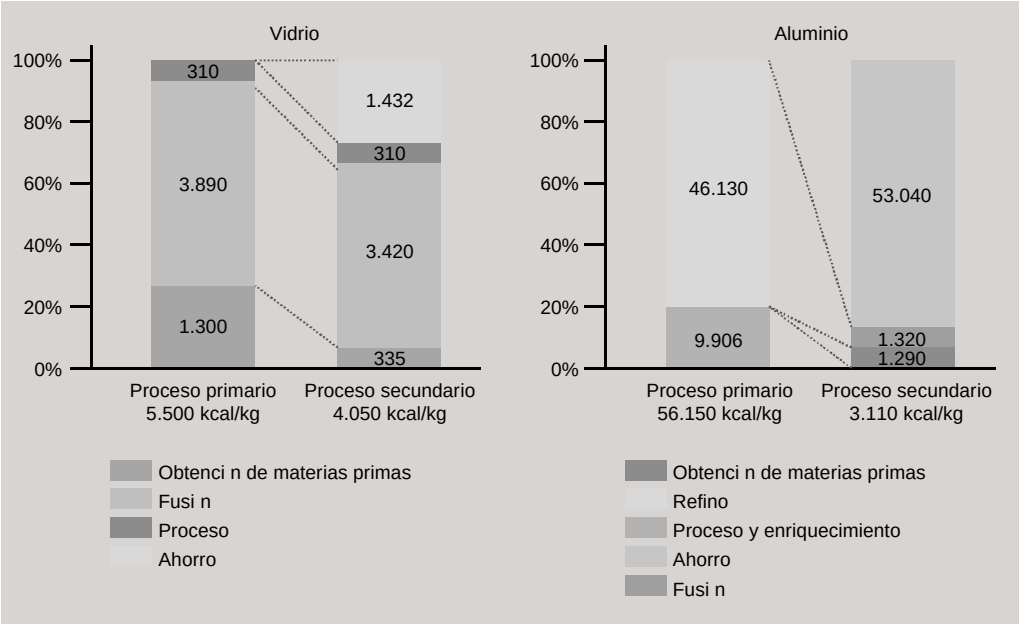


Figura 2.10. Ejemplos de ahorro de energía en el proceso de reciclaje.

vertedero controlado (el hierro es un metal relativamente degradable, transformándose fácilmente en óxido cuyo efecto es inocuo para el medio) y fabricar un envase completamente nuevo. El resultado del ACV daría luz sobre los límites ecológicos.

El límite económico es más sencillo de establecer. Estriba en conocer cuál es el precio de mercado y compararlo con los gastos de recogida. Evidentemente, el coste presentará un mínimo, que normalmente oscila sobre el 50% de la recuperación. Esta cifra tiende asintóticamente al coste de la recogida del residuo. A partir de este valor la recuperación se hace cada vez más interesante como simboliza el gráfico de la Figura 2.11.

La valorización, como actividad humana y económica, produce un impacto en el medio ambiente que se ha de minimizar. Otra dificultad radica en el hecho de que la mayor parte de materiales y productos que circulan por los diversos circuitos de proceso y consumo no están diseñados para favorecer su valorización, y, por tanto, el aprovechamiento no es óptimo ni, en muchos casos, posible, produciéndose residuos y un continuo agotamiento de los recursos. Por otro lado, desde un punto de vista socioeconómico, los modelos de comportamiento y consumo de la sociedad se han de ir modificando para facilitar la valorización de los residuos; sin el desarrollo de mercados no se puede cerrar el círculo.

Casi todos los materiales residuales tienen algún componente potencialmente valioso, ya sea por la naturaleza del material o por la energía que contiene. Sin embargo, esto no quiere decir que todos los residuos sean valorizables, ya que el material valioso puede encontrarse en concentraciones muy bajas o en un estado tan contaminado que no sea económicamente viable intentar aprovecharlo. Otra cuestión es disponer del material en cantidades suficientes para que con la tecnología actual resulte rentable su valorización.

Así pues, la opción de la valorización ha de ser el resultado de una evaluación exhaustiva del ciclo de vida del producto, y de una comparación de las diferentes opciones para decidir si un residuo es preferiblemente valorizable, y hasta qué porcentaje de su generación interesa valorizar. Es decir, no se ha de valorizar el máximo que se pueda y a cualquier precio, sino sólo hasta aquel punto en que su valorización genere un balance ambiental más favorable que cualquier otra opción. En este sentido, los objetivos en materia de valorización han de estar avalados por los costes económicos y ambientales de su realización, así como por su viabilidad tecnológica. Un ejemplo de actualidad sobre lo comentado lo constituye la posible valorización de los componentes extraídos de la denominada «chatarra electrónica».

Los factores ambientales vendrán dados principalmente por las cargas asociadas a los procedimientos de conversión y transporte del ciclo de valorización. Cuando se considera el sistema global, se percata que un incremento de la fracción valorizada puede hacer crecer la energía y los recursos consumidos, y también las emisiones de los procesos de tratamiento (derivados de recogidas más extensas, sistemas de recuperación más costosos en recursos, etc.) hasta tal punto que el balance ambiental acabe resultando negativo al valorizar una fracción más elevada. Sin embargo, hay que precisar que cada residuo y sistema de valorización se comporta de forma diferente, y que, en consecuencia, estos límites de valorización se habrán de estudiar para cada caso y sistema.

En cuanto a los sistemas económicos, es necesario comentar que las actividades de valorización son

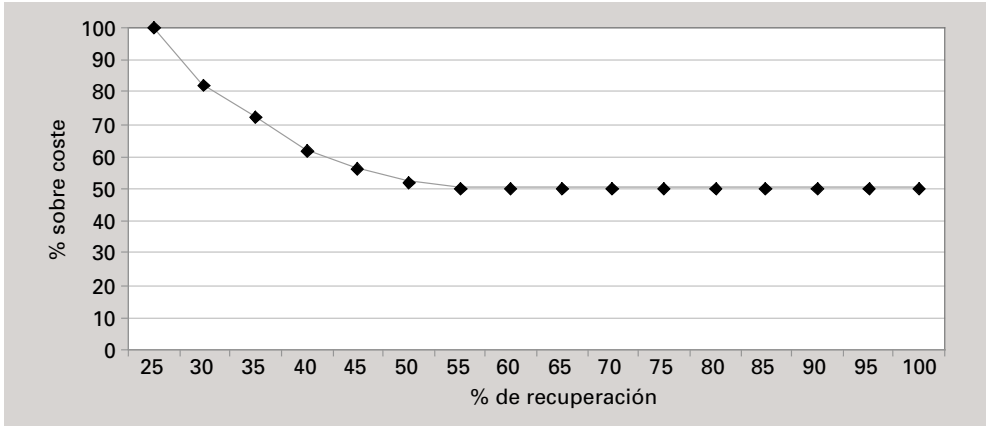


Figura 2.11. Representación gráfica de los límites de reciclado.

actividades productivas que dependen tanto de los mercados de materias valorizables, como de los mercados de las materias recuperadas obtenidas. No se analizará el estudio de los factores económicos asociados pero sí se comentará la importancia del sistema de recogida, ya que puede ser el motivo que un sistema de valorización funcione o no, y sea o no rentable (especialmente para los residuos domésticos de postconsumo, ya que presentan una gran dispersión y una mayor mezcla con otros residuos). Por esta razón es necesario definir con mucho cuidado el alcance de una valorización y el coste total que supondrá considerando el ciclo completo: recogida, almacenamiento, selección, acondicionamiento, proceso de valorización y proceso de distribución de la materia recuperada.

Sobre la base de lo que se acaba de comentar, se pueden elaborar las gráficas que aparecen en la Figura 2.12. Si aumentan los porcentajes de valorización, se incrementa el ahorro de recursos (si sólo se considera el material valorizado), y a su vez también aumenta el beneficio económico, pese a que a mayores porcentajes de valorización este beneficio económico va disminuyendo. En este sentido, al incrementar los porcentajes de valorización, el beneficio marginal de la valorización decrece, es decir, los costes netos y las cargas ambientales de las operaciones de valorización se incrementan progresivamente. Se puede considerar que los límites económicos se alcanzan cuando el coste neto de la valorización excede el coste de la disposición del rechazo del residuo, incluyendo los costes adicionales que se hayan establecido fiscalmente y que potencien un diferencial más favorable a la alternativa de la valorización. La administración puede soportar exceder el límite económico en un cierto grado siempre que comporte un beneficio ambiental. En cuanto a los límites ambientales, se pueden calcular de la misma forma si se establece un nivel máximo de impacto ambiental, tal y como se representa en la gráfica correspondiente de la Figura 2.12.

Determinar el porcentaje idóneo a valorizar de un tipo de residuo será fruto de un compromiso entre los dos límites. La identificación de los límites de valorización requiere de estudios exhaustivos de los balances ambientales de la valorización de residuos en cuanto al límite ambiental, y de estudios de mercado y tecnologías en cuanto al límite económico. Hay que tener presente que los puntos de intersección dependerán del mercado y del sistema socioeconómico establecido, pero la tendencia general de las curvas no se podrá invertir, ya que en el fondo vienen determinadas por las leyes de la termodinámica (repetir los ciclos implica una disminución en el valor del material del residuo ~~au~~mento de la entropía ~~y~~ en el valor energético).

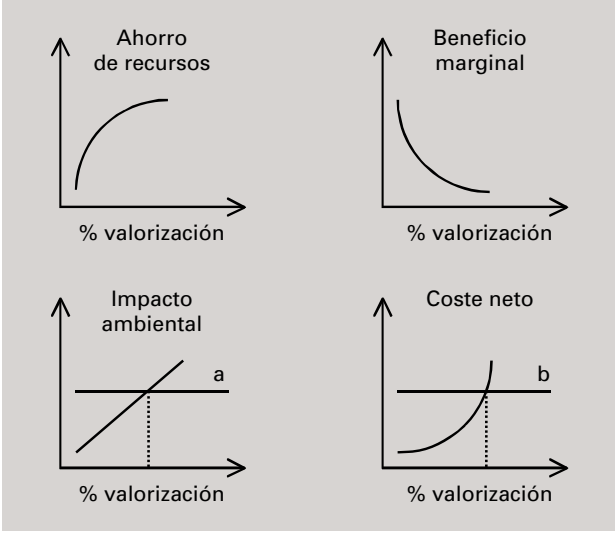


Figura 2.12. Identificación de los límites ambientales y económicos de la valorización de residuos: (a) nivel aceptable, (b) coste de disposición final.

6. El Catálogo de Residuos

De acuerdo a la Resolución de 17 de noviembre de 1998, de la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental, se dispone la publicación del Catálogo Europeo de Residuos (CER), aprobado mediante la Decisión 94/3/CE de la Comisión, de 20 de noviembre de 1993. El CER es una lista armonizada y no exhaustiva de residuos, es decir, una lista que será revisada periódicamente y, cuando sea necesario, modificada con arreglo al procedimiento del Comité. No obstante, la inclusión de una sustancia en el CER no implica que sea un residuo en cualquier circunstancia. La inclusión sólo es pertinente cuando la sustancia se ajusta a la definición de residuo.

El catálogo de residuos es una herramienta que ha elaborado la administración con el fin de que las empresas puedan optimizar la gestión de los resi-

duos. En él se indica la gestión correcta para cada tipo de residuo, de conformidad con las directrices emanadas desde la UE.

El CER lleva a cabo una sucinta descripción de los residuos y constituye una guía a seguir para su correcta gestión. En el mismo los residuos se hallan clasificados en 20 subgrupos. Dentro de cada uno se establece un orden de prioridad en la gestión a realizar, de acuerdo con los criterios de gestión que preconiza el V Programa Europeo: minimización (MIN), Valorización (VAL), dejando el Tratamiento (TDR) en último lugar.

A continuación se muestra la clasificación del CER:

01 Residuos de la prospección, extracción, preparación y otros tratamientos de minerales y canteras.
02 Residuos de la producción primaria agraria, hortícola, de la caza, de la pesca y de la acuicultura; residuos de la preparación y elaboración de alimentos.
03 Residuos de la transformación de la madera y de la producción de papel, cartón, pasta de papel tableros y muebles.
04 Residuos de industria textil, cuero y piel.
05 Residuos del refino de petróleo, purificación del gas natural y tratamiento pirolítico del carbón.
06 Residuos de procesos químicos inorgánicos.
07 Residuos de procesos químicos orgánicos.
08 Residuos de la formulación, fabricación, distribución y utilización (FEDU) de revestimientos (pinturas, barnices y esmaltes vítreos), pegamentos, sellantes y tintas de impresión.
09 Residuos de la industria fotográfica.
10 Residuos inorgánicos de procesos térmicos.
11 Residuos inorgánicos que contienen metales procedentes del tratamiento y revestimiento de metales y de la hidrometalurgia no férrea.
12 Residuos del moldeado y tratamiento de superficie de metales y plásticos.
13 Residuos de aceite (excepto aceites comestibles y los capítulos 05 y 12).
14 Residuos de sustancias orgánicas utilizadas como disolventes (excepto los grupos 07 y 08).
15 Residuos de envases; absorbentes, trapos de limpieza, materiales de filtración y ropas de protección no especificados en otra categoría.
16 Residuos no especificados en otro capítulo de la lista.
17 Residuos de la construcción y demolición (incluyendo la construcción de carreteras).
18 Residuos de servicios médicos o veterinarios y/o de investigación asociada (salvo los residuos de cocina y de restaurante no procedentes directamente de los servicios médicos).
19 Residuos de las instalaciones para el tratamiento de residuos, de las plantas externas de tratamiento de aguas residuales y de la industria del agua.
20 Residuos municipales y residuos asimilables procedentes de los comercios, industrias instituciones, incluyendo las fracciones recogidas selectivamente.

El CER, aprobado por la Decisión 2000/532/CE, de la Comisión, de 3 de mayo, modificada por las Decisiones de la Comisión, Decisión 2001-118, de 16 de enero, Decisión 2001-119, de 22 de enero, y por la Decisión del Consejo Decisión 573-2001, de 23 de julio, es una obra extensa y compleja y tiene varios niveles. Así, el 01 *Residuos de la prospección, extracción de minas y canteras y tratamientos físicos y químicos de minerales*, la referencia 01 (dos primeros dígitos) corresponde a la clasificación general pero, los dos dígitos siguientes proporcionan mayor grado de información:

- 01 01 Residuos de la extracción de minerales.
- 01 03 Residuos de la transformación física y química de minerales metálicos.
- 01 04 Residuos de la transformación física y química de minerales no metálicos.
- 01 05 Lodos y otros residuos de perforaciones.

Y de esta manera va profundizando. La Tabla 2.5 corresponde a una muestra extraída del catálogo de residuos promulgado por la Junta de Residus (actual Agencia de Residuos de Cataluña) del Departament de Medi Ambient de la Generalitat de Catalunya, donde, a diferencia del CER, proporciona información adicional interesante.

Como se muestra en la Tabla 2.5, los residuos se clasifican en inertes, no especiales y especiales (tóxicos y peligrosos). Esta es una clasificación ya superada pero importante ya que muestra las características de los residuos que condicionan notablemente los procesos a los que se verán sometidos. A continuación se expone esta clasificación.

Tabla 2.5. Muestra del CER extraído del catálogo de residuos de la Agencia de Residuos de Cataluña

CJR	Descripción	Origen	CLA	IP	MIN	VAL	TDR
050101	Residuos de mantenimiento de desaladoras	Mantenimiento y limpieza	ES	2			T21
050102	Lodos de plantas de alquilación	Mantenimiento y limpieza	ES	2			T21
050103	Lodos de operaciones de mantenimiento y limpieza	Mantenimiento y limpieza	ES				T21
050104	Alquitranes	Procesos, y mantenimiento y limpieza	ES	2		V72	T33
050105	Lodos de descarbonatación de agua y caldera	Descarbonatación de aguas	IN			V42	T11
050106	Hidrocarburos	Fugas	ES	2	¤	V23	T21
050107	Tierras con hidrocarburos	Fugas	ES	1	¤		T21/T13
050108	Residuos de hidrocarburos con azufre	Desulfuración	ES	2			T21/T13
050109	Tierras de filtraciones residuales	Procesos de filtración	ES	1	¤		T21/T13

CJR: Código del residuo según el catálogo de la Junta de Residus (homologado al de la UE).
CLA: Clase del residuo.
IN: Inerte.
EN: No especial.
ES: Especial.
IP: Índice de peligrosidad (1: poca; 3: elevada).
MIN: Cuando incluyen ¤ hay programa de reducción de residuos.
VAL: Existe programa o vía concreta de valorización.
TDR: Tratamiento recomendado.

7. Clasificación de residuos

En la legislación catalana, antes de ajustarse a la del estado español, los residuos se clasifican en:

- Especiales (equivalentes a los tóxicos y peligrosos de la legislación española).
- No especiales.
- Inertes.

Un residuo especial es aquel que por sus características tóxicas o peligrosas, o a causa de su grado de concentración, precisa de un tratamiento específico y un control periódico debido a sus potenciales efectos perniciosos.

Cada legislación establece la frontera entre un tipo y otro de residuo. Así, en el caso catalán y siguiendo las directrices emanadas de la Directiva del Consejo de la Unión Europea (12/12/1991) relativa a los residuos peligrosos (91/689/CEE), se establece que el resultado del test estándar de lixiviación determinará que:

- Se consideran residuos inertes aquellos que no sufren ningún tipo de cambio fisicoquímico en el tiempo y no superan ninguno de los valores de la columna A de la Tabla 2.6 (excepto el punto de inflamación).
- Se consideran residuos no especiales aquellos que sufriendo transformaciones, los productos emitidos no son peligrosos y no superan ninguno de los valores de la columna B de la Tabla 2.6 (excepto el punto de inflamación).
- Se consideran residuos especiales los que por ellos mismos o sus productos de transformación resultan tóxicos y superan alguno de los límites expuestos en la columna B de la Tabla 2.6 (excepto el punto de inflamación, que ha de ser inferior).

Tabla 2.6. Clasificación de residuos.

Parámetro	A	B
Punto de inflamación (°C)	*55*	*55*
Sustancias liposolubles (%)	0,5	4
COV halogenados (%)	0,05 (¤)	0,1
COV no halogenados (%)	0,15 (¤ ¤)	0,3
As (mg/kg) s.m.s.	250	2.000
Cd (mg/kg) s.m.s.	50	1.000
Cu (mg/kg) s.m.s.	6.000	*6%*
Cr (mg/kg) s.m.s.	3.000	*5%*
Hg (mg/kg) s.m.s.	25	250
Ni (mg/kg) s.m.s.	2.000	*5%*
Pb (mg/kg) s.m.s.	2.000	*5%*
Zn (mg/kg) s.m.s.	8.000	*7,5%*

COV: Compuesto orgánico volátil.
(¤) Ningún compuesto puede superar individualmente 100 mg/kg. La suma no puede superar el 5%.
(¤ ¤) Ningún compuesto puede superar individualmente 300 mg/kg. La suma no puede superar el 0,15%.

Se entiende por subproducto aquel residuo procedente de una actividad productiva, o de consumo, que se utiliza en otros procesos productivos sin que sea necesario para ello realizar operaciones de adecuación significativas.

En casi todas las legislaciones se halla un vacío a la hora de definir la palabra subproducto. En muchas de ellas no existe y en otras, como en la legislación propia de Cataluña, se recurre a una definición poco clara: Serán subproductos aquellos residuos en los que no se haya de llevar a cabo operaciones de adecuación significativas. La clave está en las palabras operaciones significativas.

Dos ejemplos bastarán para esclarecer el dilema. Pongamos el caso de una empresa A que dispone de unos embalajes de madera que cree que pueden reutilizarse para el mismo uso. Sin embargo, la empresa B, receptora de la mercancía, estima que deben hacerse unas pequeñas reparaciones para su correcto uso. De este modo, la empresa B pide a la empresa A que envíe los *palets* a la empresa C para que los repare. En pura ortodoxia, la empresa C es una tratadora de residuos. No obstante, la operación de reciclaje consistirá en desclavar algunos travesaños y volver a clavarlos. Es evidente que esta operación no entraña peligro alguno para el medio ambiente; en consecuencia, a estos residuos deberían serles aplicados el calificativo de subproductos, su gestión quedará al margen del circuito de residuos y la empresa C no debería tener el título de tratador. Hasta aquí nadie tendrá nada que objetar. Pero veamos el siguiente ejemplo.

Un recuperador de productos textiles adquiere una partida de trapos usados y pretende llevarlos a la tintorería para su posterior venta. A primera vista el ejemplo es aún más inocente que el anterior, pero resulta que los trapos sucios proceden de un taller de reparación de automóviles. Así pues los residuos contienen restos de hollín, hidrocarburos inquemados, disolventes, gasolina, aceites usados, etc. Es evidente que ahora la empresa intermedia que ha de lavar los trapos sí que ha de ser una empresa que tenga el título de residuos, puesto que el agua de lavado será, a su vez, un residuo contaminante.

Por esta razón el legislador se ve en la necesidad de establecer la frontera en algún sitio. Por ello, y por conservadurismo, opta por la solución más cómoda y declara que no existen subproductos: todo son residuos. Otras legislaciones más voluntariosas, como la catalana, establecen un criterio para definir una categoría de residuos, que una vez desclasificados pueden seguir un circuito más rápido y diferente de los demás residuos. En realidad, si el establecer estas diferencias complica más la burocracia, justo es reconocer que también se agiliza y simplifica mucho la gestión de residuos, sobre todo al facilitar el intercambio.

7.1. LOS RESIDUOS TÓXICOS Y PELIGROSOS

En cuanto a la generación de residuos especiales en España existen más de 30.000 centros productores. Por sectores, como muestra la Figura 2.13, el que produce mayor cantidad de residuos es el químico.

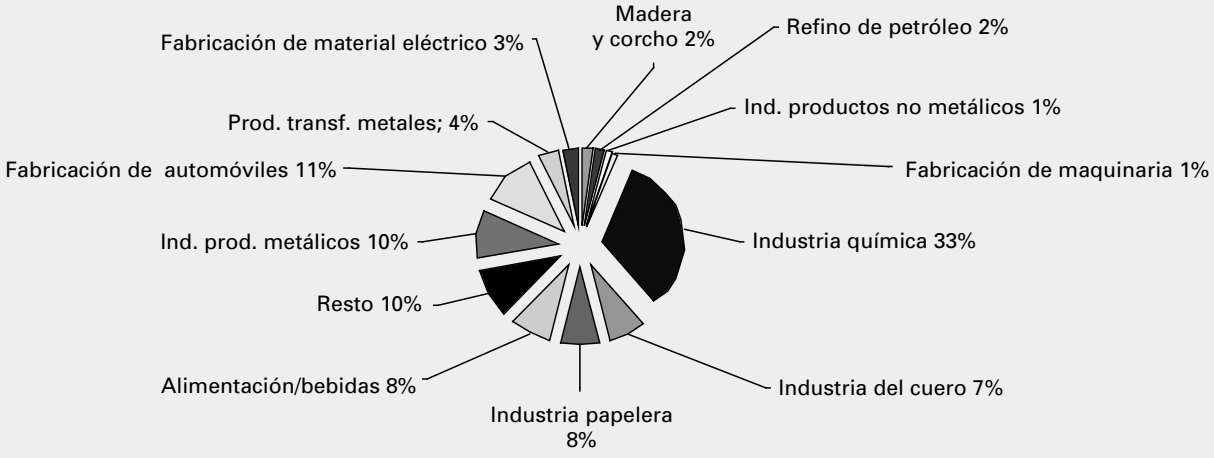


Figura 2.13. Distribución de residuos por sectores industriales. (Fuente: EMGRISA).

La Tabla 2.7 muestra la generación de residuos especiales en diferentes países y su incidencia en términos de población. La última columna (*ratio*) se refiere a la generación de residuos *per capita*, expresado en kg de residuos por miles de dólares de producto interior bruto. A la vista de estos datos resulta obvio que hay que hacer un gran esfuerzo en pro de la minimización de residuos y en orden a fomentar la reutilización.

Tabla 2.7. Producción de residuos por países

País	Residuos especiales (10^3 t)	Producción (kg/hab)	Ratio (kg/10^3 US$)
Dinamarca	112	21,8	1,11
Francia	3.000	53,9	3,41
Alemania	6.000	98,0	5,37
Italia	3.800	66,3	5,01
Países Bajos	1.500	102,3	7,04
España	1.708	44,0	5,91
Reino Unido	4.500	79,0	6,72
Estados Unidos	275.000 (¤)	1.127,4	57,23
Japón	666	5,5	0,3

(¤) La gran diferencia que aparece entre la producción de residuos en Europa respecto a EE UU se basa en que en este último país los fangos de depuradora se consideran residuos especiales, mientras que en Europa se hallan dentro de las normativas específicas.

8. Introducción al Ciclo de Vida

En los últimos años se han desarrollado técnicas de análisis que permiten evaluar las consecuencias ambientales de las actividades humanas. Una de las herramientas que mayor aceptación puede adquirir en el futuro es el ecobalance o análisis del ciclo de vida (ACV). Se trata de un método dinámico e iterativo que permite conocer y valorar las cargas ambientales asociadas al ciclo de vida del producto, procesos o actividades, en el marco de un sistema de límites definidos.

El ACV es una herramienta válida para determinar los impactos ambientales de un producto o actividad. Se trata de un procedimiento que identifica, clasifica y cuantifica los efectos que sobre el medio ambiente tiene cualquier producto, proceso o actividad industrial, desde que se extraen las materias primas hasta que se convierten en residuos; por esta razón, este análisis también se conoce como «desde la cuna a la tumba» (*from cradle to grave*). El ACV consiste, básicamente, en realizar un balance material y energético del sistema estudiado identificando las entradas y salidas, y, posteriormente, evaluando los diferentes impactos medioambientales que puedan causar.

La SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) define el ACV como *un proceso objetivo para evaluar las cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad, identificando y cuantificando el uso de materia y energía y los vertidos al entorno, para determinar el impacto que ese uso de recursos y esos vertidos producen en el medio ambiente, y para evaluar y llevar a la práctica estrategias de mejora ambiental.* El estudio incluye el ciclo completo del producto, proceso o actividad, teniendo en cuenta las etapas de extracción y procesado de materias primas, producción, transporte y distribución, uso, reutilización y mantenimiento, y reciclado y disposición del residuo.

El ciclo de vida de un producto abarca desde la extracción y procesamiento de las materias primas, pasando por la fabricación, el transporte, la distribución, la utilización, la gestión una vez deviene fuera de uso y la disposición final del residuo. Por ejemplo, el impacto que causa el uso de las energías no renovables no se produce únicamente durante su consumo; todas las etapas de su ciclo de vida (desde que se extrae el recurso hasta que se utiliza la energía generada) son contaminantes, tal y como se muestra en la Figura 2.14. Entre los principales daños producidos sobre el medio ambiente destacan las emisiones atmosféricas, la contaminación de aguas y la ge-

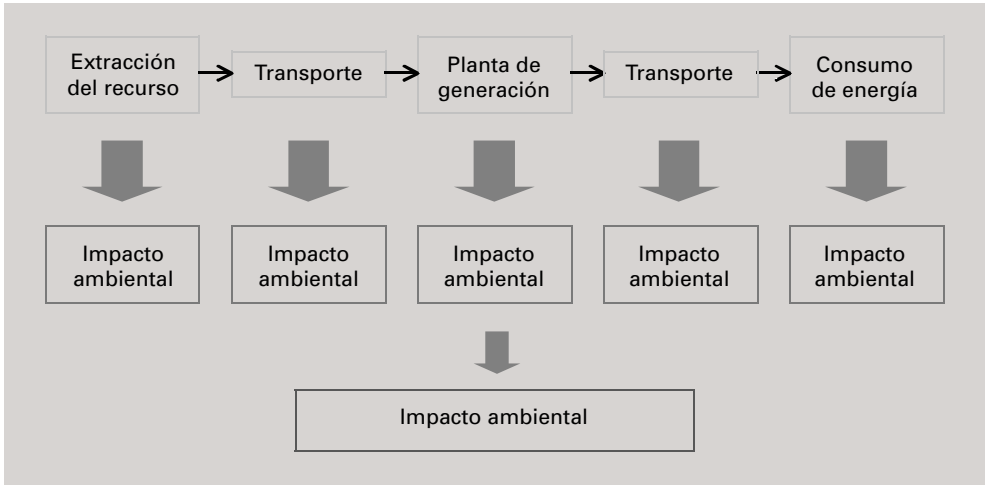


Figura 2.14. Todas las etapas del ciclo de vida de las energías no renovables son contaminantes.

neración de residuos sólidos; además de otro tipo de impactos: degradación del suelo, ruido, impactos paisajísticos, etc.

Como es lógico, y como toda técnica, el ACV ha tenido sus defensores y detractores. Entre estos últimos, y con razón, estaban aquellos que criticaban que el ACV no valorase la naturaleza del origen de la materia prima. Desde la óptica ambiental debería valorarse de algún modo el hecho de que un mismo producto pueda fabricarse a partir de una materia prima renovable, por ejemplo, la madera, o de una materia prima no renovable, por ejemplo, el plástico. Otra crítica era la poca sensibilidad para valorar el diferente impacto que pudiera ocasionar una misma cantidad de contaminante. Sin duda, la mayor parte de estas carencias han sido debidas a la juventud del método y, poco a poco, van siendo subsanadas. Por otra parte, las ventajas del método son claras y la prueba de ello es que cada día está más extendido e incluso las leyes solicitan su aplicación para dilucidar la bondad ambiental del uso de un determinado producto.

Una de las principales ventajas del ACV es su aceptación por los diversos grupos o sectores sociales implicados: industriales, legislativos y ecologistas. A estos últimos el ACV les permite:

- La identificación de ciertas lagunas de conocimiento que permiten marcar las prioridades de las investigaciones.
- La ayuda a la planificación a largo término en las acciones de gobierno para el ahorro de materias primas y energía, reducción de los impactos ambientales y riesgos provocados por sustancias y productos.

En algunos casos y para analizar determinadas situaciones el ecobalance puede dejar fuera de su consideración la valoración de las materias primas así como el sistema de fabricación, estableciendo la denominada «regla de corte», tal y como se muestra en la Figura 2.15.

El análisis de ciclo de vida se circunscribe a la evaluación de la energía y de las materias auxiliares precisas para la obtención y transporte de las materias primas al centro de producción, la fabricación y luego empalma con la evaluación y gestión de estos productos una vez fuera de uso, es decir, una vez devienen residuos. La evaluación se lleva a cabo en términos energéticos y en puntuaciones sobre las emisiones sólidas, líquidas y gaseosas que dicha gestión ocasiona.

8.1. ESTRUCTURA Y DESARROLLO DE UN ACV

Según la nueva norma internacional de ACV, ISO 14040, y que sustituirá junto a la ISO 14044 a la batería de normas ISO 14040-43 actuales, el ACV consiste en una compilación y evaluación de las entradas, las salidas y los impactos ambientales potenciales del sistema asociado a un producto a lo largo de su ciclo de vida. La Figura 2.16 muestra esquemáticamente esta definición.

El ACV es una herramienta de análisis de sistemas y puede aplicarse prácticamente a cualquier sistema que tenga interacción con el medio ambiente. No tiene que ser necesariamente un producto, sino que puede ser un servicio u otra actividad humana. Por ejemplo, puede utilizarse para diseñar el mejor *mix* de tratamiento de los residuos de cable de PVC,

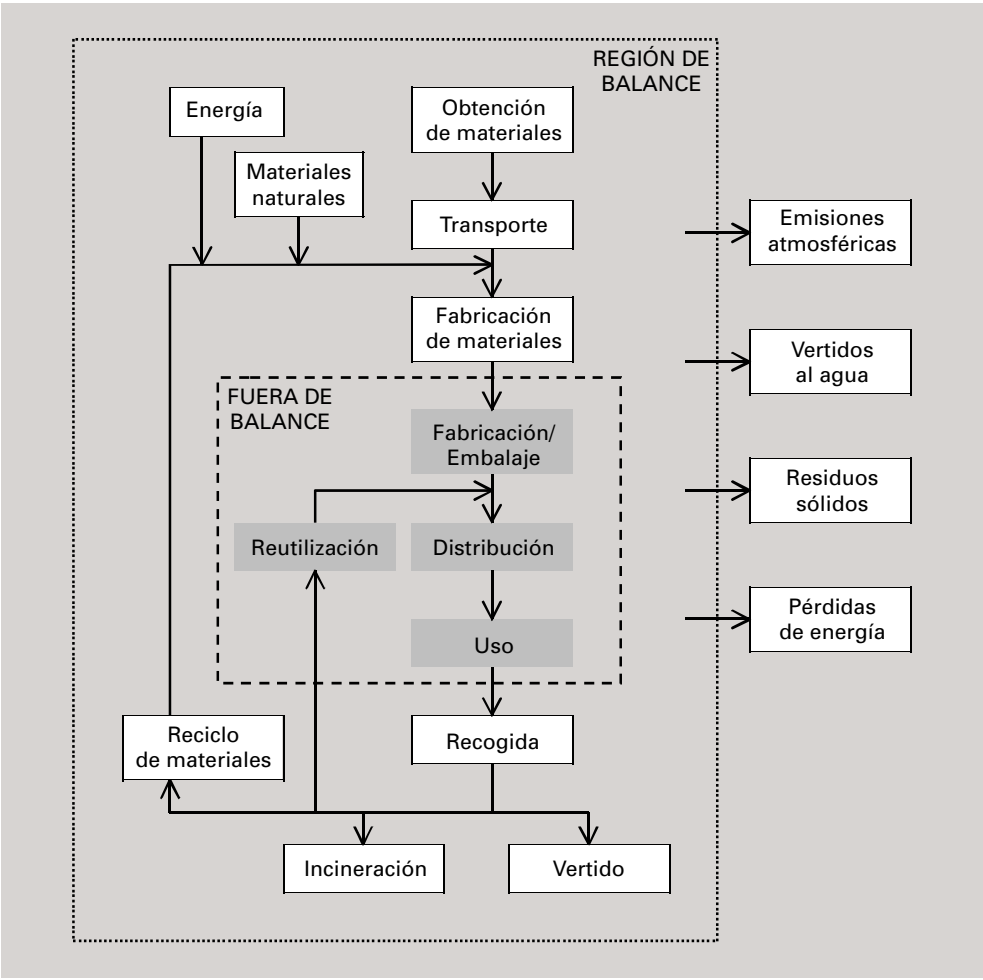


Figura 2.15. Representación esquemática del análisis de ciclo de vida.

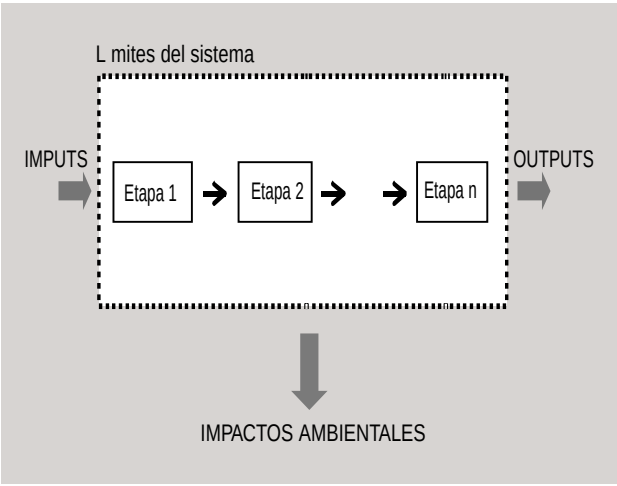


Figura 2.16. Ciclo de vida de un producto y corrientes incluidas en un balance.

tal y como se indica en la Figura 2.17. Si este sistema se modeliza con el *software* GaBi4[3] se pueden introducir y evaluar diferentes escenarios de recuperación: desde un 100% de vertido, hasta un *mix* en el que coexistan los cinco procesos de gestión.

Como indica la Figura 2.18, el ACV es una metodología paso a paso, con cuatro fases bien diferenciadas:

- Definición del objetivo y el alcance del estudio (*goal and scope*): ISO 14040.
- Análisis de inventario del ciclo de vida (*life cycle inventory analysis*): ISO 14041.
- Evaluación del impacto del ciclo de vida (*impact assessment*): ISO 14042.
- Interpretación (*interpretation of results*): ISO 14043.

[3] GaBi4 es un software de modelización avanzado de ACV *(life-cycle assessment*) que permite la descripción y comparación de sistemas productivos complejos, así como el establecimiento de escenarios y la modelización en paralelo de costes (*life-cycle costing*) y de horas de trabajo (*life-cycle working time*). (Más información en: http://www.gabi-software.com).

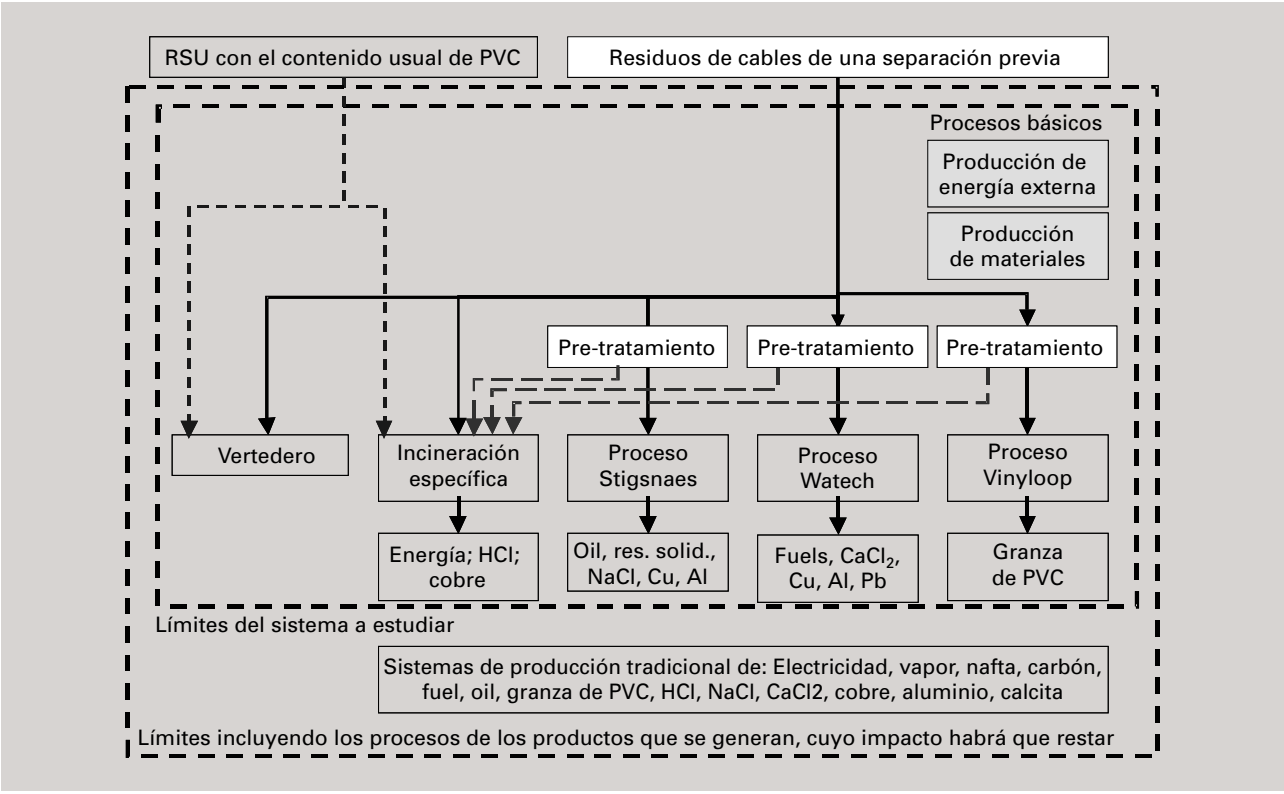


Figura 2.17. Modelización de diferentes sistemas de gestión de PVC de cables eléctricos.

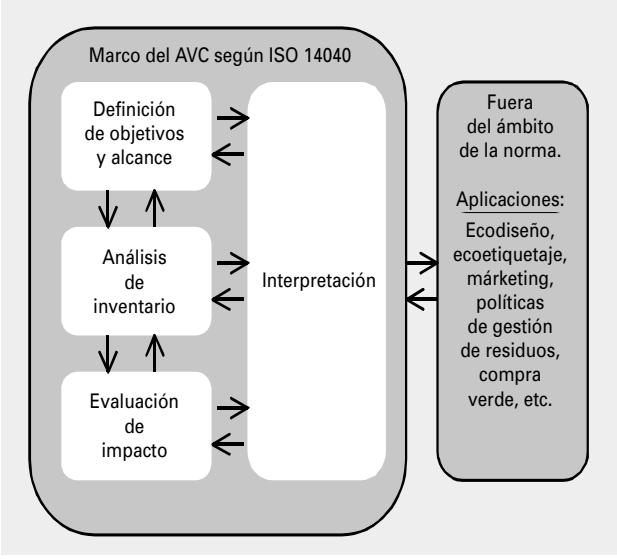


Figura 2.18. Fases metodológicas del ACV según norma ISO 14040. (1996).

Asimismo se trata de una metodología orientada a aplicación. Se han descrito ya y se están llevando a cabo en la práctica multitud de aplicaciones del ACV por parte del sector privado y del sector público: ecodiseño, ecoetiquetaje, marketing, políticas de gestión de residuos, compra verde, etc. Es necesario entender que los diferentes actores implicados, o grupos de interés, pueden tener diferentes expectativas (positivas y negativas) hacia el ACV, dependiendo de sus propios intereses y experiencia. En el momento de realizar un ACV es vital tener en cuenta qué diferentes aplicaciones requerirán distintos métodos y distintos datos.

Desde el inicio de los estudios del ACV ha habido una gran tendencia a centrarse en la metodología del inventario: cuantificación de las emisiones al medio, energía y materiales usados durante la fabricación del producto, envases, material, proceso o actividad, etc., algo lógico al tratarse de un tipo de documentación más asequible a los técnicos conocedores de estas materias. Más tarde se desarrollaron las técnicas de evaluación ambiental. Esta parte tiene como finalidad evaluar la importancia de los impactos potenciales que se derivan de los resultados obtenidos de la fase de inventario. En su acepción más amplia un impacto puede definirse como cualquier efecto sobre la salud y bienestar humano o sobre el medio ambiente. En el contexto de los ACV, un impacto puede definirse como la anticipación razonable de un efecto analizado en la etapa de inventario. La Figura 2.19 contempla la energía asociada a diversos

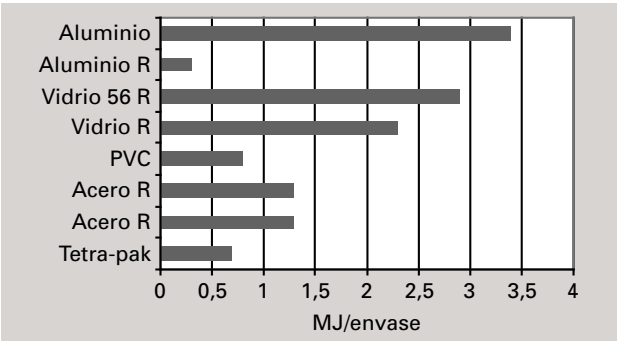


Figura 2.19. Representación esquemática de la energía asociada a ciertos envases.

envases corrientes para la misma capacidad útil. La letra «R» simboliza el material reciclado. Puede observarse que el material que precisa menos energía para su reciclado es el aluminio R, mientras que el que necesita más es el aluminio de primera fusión.

El primer paso metodológico de un ACV consiste en definir el objetivo del estudio y el alcance del mismo. Recientemente se ha realizado el ACV del vino de La Rioja (Clavijo *et al.* 2005). En el informe se marcaban unos objetivos muy diversos, convenientemente definidos, ya que un ACV realizado para un objetivo concreto, no puede utilizarse para otro objetivo. Por ejemplo, un ACV realizado para comparar opciones de reciclaje de residuos de la construcción, no puede utilizarse de manera directa para establecer una ecoetiqueta que marque estrategias de ecodiseño de los materiales en cuestión. Los objetivos definidos en el ACV del vino de Rioja son los siguientes:

- Desarrollar un apartado de una de las tareas del proyecto en cuestión.
- Dentro del objetivo general de la trazabilidad alimentaria, dar una visión de ciclo de vida del sistema de producción de vino tradicional en esta región con el fin de realizar una primera determinación de los procesos de mayor repercusión ambiental en la cadena de producción, todo ello enfocado a ayudar al Gobierno de La Rioja a establecer un modelo de producción vitivinícola más respetuoso con el medio ambiente.
- Favorecer entre los técnicos y responsables de medio ambiente de la Consejería un proceso de aprendizaje sobre el análisis del ciclo de vida.
- Extender este conocimiento a otros ámbitos de la sociedad y, más concretamente, a los socios del proyecto, a las bodegas en general y a la Comisión Europea.

Dentro del alcance del estudio es muy importante la definición del sistema a estudiar y sus límites, tal y como se aprecia en el ejemplo de la recuperación de cables de PVC. La otra decisión fundamental que afectará a la cantidad de trabajo a realizar posteriormente es la elección de las categorías de impacto ambiental que se quieren evaluar. A cada categoría contribuyen diferentes contaminantes: cuantas más categorías se quieran evaluar, más contaminantes deberán inventariarse para cada proceso.

Una vez definidos los procesos a incluir en el estudio y los flujos que los unen empieza la fase de análisis de inventario de ciclo de vida, que fundamentalmente consiste en buscar datos cuantitativos de contribuyentes a las categorías de impacto esco-

Tabla 2.8. Categorías de impacto ambiental usadas habitualmente.

Categoría de impacto	Alcance espacial	Unidad de equivalencia (kg)	Algunos contribuyentes
Recursos abióticos	Global	Sb	Elementos de la tabla periódica, minerales, combustibles fósiles, etc.
Cambio climático	Global	CO_2	CO_2, metano, N_2O, CFC's, HCFC's, etc.
Destrucción del ozono estratosférico	Global	CFC-11	Diversos compuestos orgánicos clorados, fluorados y bromados.
Toxicidad humana y ecotoxicidad	Local y global	1,4-diclorobenceno	Compuestos orgánicos clorados, aromáticos, metales pesados, etc.
Formación de fotooxidantes	Regional y local	Eteno (etileno)	Compuestos orgánicos alifáticos y aromáticos de cadena corta (volátiles).
Acidificación	Regional	SO_2	Amoníaco, SO_x, NO_x, HCl, HF, H_2S, ácidos en general, etc.
Eutrofización	Regional y local	fosfato	Fosfatos, nitratos, NO_x, DQO, amoníaco, etc.

gidas. Los pasos recomendados a seguir son los siguientes:

- Buscar datos de calidad actualizados y de empresas reales para aquellos procesos que forman parte del núcleo del sistema en estudio. Por ejemplo, los de la empresa propia y de los proveedores principales.
- Buscar datos del resto de procesos en la base de datos del software de ACV.
- Realizar el primer análisis de contribución al resultado final.
- Mejorar los datos de aquellos procesos con una mayor contribución al impacto total del sistema y de aquellos que, siendo significativos, ofrecen menos confianza en cuanto a la calidad de los datos de que se dispone.

El tercer paso es la evaluación de impactos ambientales. Hay más de una docena de categorías de impacto ambiental consensuadas internacionalmente: desde algunas de ámbito global, como el calentamiento global o la destrucción de la capa de ozono estratosférico, hasta el ámbito más local, como la toxicidad o la niebla fotoquímica. Los programas informáticos ofrecen resultados en estas categorías. La evaluación de los mismos debe realizarse teniendo en cuenta la calidad de los datos que finalmente se ha obtenido en la fase anterior de inventario y la importancia relativa que da la sociedad y sus diferentes actores a cada categoría de impacto. La Figura 2.20 muestra un gráfico típico de evaluación de impacto, en el que se comparan diferentes alternativas al tratamiento de aceites industriales usados.

La última parte de un ACV consiste en la interpretación del estudio. No basta con una evaluación de resultados: la normativa internacional obliga a realizar diferentes análisis que pongan de relieve la confianza en los mismos:

a) Análisis de contribución al resultado final de procesos, sustancias, hipótesis, métodos de asignación de cargas ambientales entre diferentes sistemas, etc.
b) Análisis de completitud del estudio y una argumentación suficiente, o una evaluación cualitativa, de las partes importantes que han quedado excluidas.
c) Análisis de sensibilidad del resultado final al cambio: de hipótesis tomadas durante la realización del estudio, de datos a variar en los próximos años, de tecnologías escogidas para determinados procesos, etc.
d) Análisis de consistencia en la metodología usada: en la antigüedad o la procedencia geográfica de los datos, en la inclusión o exclusión de procesos o contaminantes, en la utilización de datos específicos o de medias sectoriales, etc.

En algunos casos, cuando se realizan comparaciones ambientales que van a hacerse públicas y que pueden afectar al mercado, la norma obliga a realizar una revisión crítica del estudio por parte de un panel de expertos externos. En los demás casos es siempre aconsejable realizar esta revisión, al menos por parte de un experto de ACV. Estas revisiones son más eficientes si se hacen en paralelo a la realización del es-

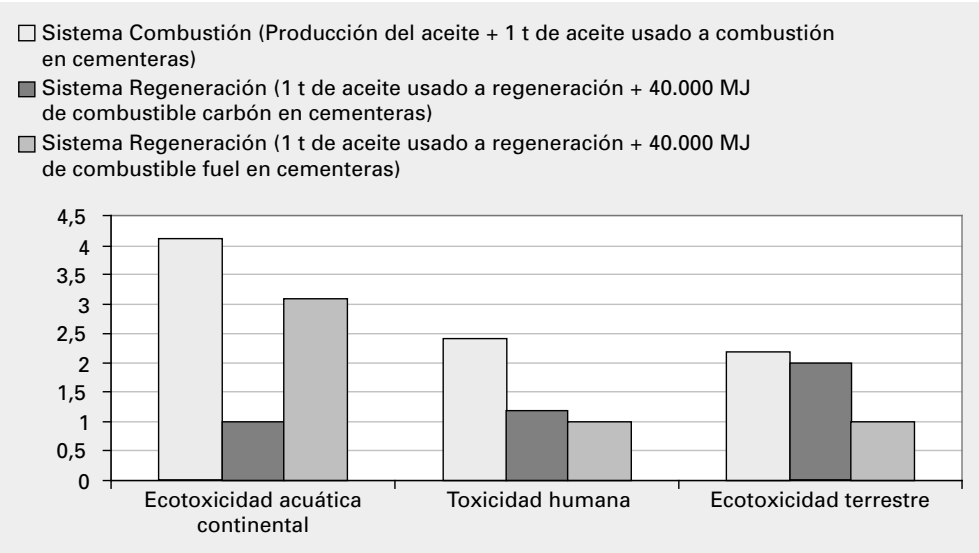


Figura 2.20. Resultado de la aplicación del ACV sobre tres categrorías de impacto ambiental relacionadas con la toxicología aplicado a la comparación ambiental del reciclado de aceites industriales con su incineración en cementeras (Fullana et al 2005).

tudio, ya que si se hacen al final, pueden detectar problemas de difícil solución con los recursos y el tiempo restantes hasta la entrega del informe final.

Conviene indicar que la evaluación de impacto es la parte más delicada de los ACV. Un método sencillo y rápido de aplicación es el de «aproximación a los volúmenes críticos», en el que se valora la cantidad de contaminante emitida al medio durante el ciclo de vida. El volumen crítico caracteriza cada emisión en el volumen de aire o agua necesario para diluirlo hasta su límite legal. Sin embargo, presenta graves carencias. Cada país tiene sus propios límites y los impactos no son comparables. Los límites de muchos contaminantes no están establecidos ni se conocen sus consecuencias. El método de los «ecopuntos» es más reciente y está basado en el concepto de la singularidad ecológica. En la actualidad cada país está desarrollando un método de evaluación de impactos. En la etapa correspondiente a la evaluación de mejoras de un ACV se identifican y evalúan las opciones para reducir el impacto o las cargas ambientales del sistema en estudio, es decir, las conclusiones.

8.2. APLICACIONES DEL ACV AL RECICLAJE

El ACV se ha usado desde hace años en la evaluación de alternativas de reciclaje de diferentes tipos de residuos. En esta sección se darán algunos ejemplos recientes de materiales y productos. El desarrollo metodológico puede seguirse en la revista internacional de ACV, en la que prácticamente aparecen artículos en cada número publicado avanzando en las especificidades de la aplicación del ACV al reciclaje y otros sistemas de gestión de residuos.

En abril de 2004 se presentó un estudio de alternativas de reciclaje de papel y cartón (ETCWMF 2004) encargado por la Dirección General de Medio Ambiente de la Comisión Europea. El objetivo fue la identificación y revisión crítica de toda una serie de estudios de ACV que evaluaban diversas alternativas de reciclaje de estos materiales. Una conclusión bastante general que se encontró fue que el impacto ambiental asociado al reciclaje era menor al vertido o a la incineración. Es posible la preferencia de la incineración con recuperación energética en alguna circunstancia geográfica y un determinado suministro energético fuera preferible, aunque dicha afirmación no está vinculada al estudio mencionado.

El sector empresarial que más impulso dio al ACV como herramienta para la evaluación comparada de materiales o de procesos de gestión de un material fue el sector del plástico. Motivado por el asalto constante por parte de ONG ambientalistas y consumidores tuvo inicialmente una posición reactiva utilizando el ACV como arma de marketing para demostrar que en muchas categorías de impacto el plástico era un material bien posicionado ambientalmente. Últimamente su posición es mucho más proactiva y utiliza el ACV para mejorar ambientalmente los sistemas en los que intervienen plásticos o para descubrir las mejores rutas de tratamiento de los residuos de plástico, promovido en gran parte por las sucesivas Directivas de Envases y Residuos de Envases.

La Ley 11/1997 de Envases y Residuos de Envases, de 24 de abril de 1997, disponía la aplicación de políticas preventivas con el objetivo de reducir un 10% para el año 2001 la cantidad de envases y su impacto. El Real Decreto por el que se adoptaba el Reglamento para la ejecución de esta Ley 11/1997 (Real Decreto 728/1998, de 30 de abril) obligaba a los envasadores con una producción mínima de envases, en función del material de envase al establecimiento de planes empresariales de prevención. Según el Artículo 3, punto 2.a, los planes empresariales de prevención deben contener indicadores respecto a «el aumento de la proporción de la cantidad de envases reutilizables en relación a la cantidad de un solo uso, salvo que un análisis de ciclo de vida demuestre que el impacto ambiental de la reutilización de dichos envases es superior al del reciclado u otra forma de valorización». De hecho, la Directiva de Envases era aún más clara al dar al ACV el papel de método de decisión en el orden de preferencia en la gestión de residuos de envases: «…los ACV han de terminarse lo más rápidamente posible para justificar un orden de preferencia de los envases reutilizables, reciclables y valorizables». Según indica el artículo 6.a, el Parlamento Europeo y el Consejo han de examinar los resultados de las técnicas de evaluación, tales como los ecobalances.

No sólo papel y plástico han sido objeto de estudio mediante ACV para el caso de alternativas de envasado, también es frecuente encontrar estudios sobre vidrio o metales. Resulta muy interesante investigar los informes preparados por diferentes institutos o asociaciones internacionales de metales. En estos estudios de ACV se incluye mucho desarrollo metodológico y aplicación sobre el reciclado de metales. Destacan los estudios sobre níquel (Nickel Institute, 2006), cobre (Deutsches Kupferinstitut, 2006), acero (International Iron and Steel Institute, 2006) y

aluminio (International Aluminium Institute, 2006). Todos estos institutos han publicado estudios de ACV de los materiales y también de productos semielaborados, como tubos, planchas, cables, etc., casi todos ellos producidos a partir de diferentes porcentajes de materiales reciclados.

En cuanto a productos ya se ha apuntado anteriormente el conjunto de estudios encargados por diferentes instituciones para la evaluación del reciclado de los aceites industriales usados motivados por el inminente cambio legislativo europeo, en los que se observa una preferencia del reciclado frente a la incineración en la mayoría de categorías de impacto. También las Directivas sobre aparatos eléctricos y electrónicos (Directiva 2002/96/CE), sobre productos que usan energía (Directiva 2005/32/CE), y sobre el fin de vida de vehículos (Directiva 2000/53/CE) han obligado a la utilización del ACV por parte de numerosas empresas para determinar el impacto ambiental relativo de diferentes opciones de diseño y de gestión de residuos de productos de estos sectores tan importantes.

9. Prioridades en la gestión de residuos

El Consejo de Ministros de Medio Ambiente de la Unión Europea, reunido el 15 y 16 de diciembre de 1992 aprobó una Resolución para fijar la estrategia y las prioridades sobre la gestión de residuos en el marco de un desarrollo sostenible. La estrategia, válida hasta el año 2000, incluye la jerarquía de gestiones que deben adoptarse haciéndose eco, en primer lugar, en la minimización de residuos y, a continuación, en el fomento del reciclaje y la reutilización, dejando en último lugar la optimización de los métodos de tratamiento y eliminación. La Tabla 2.9 expone los objetivos generales, los objetivos para el año 2000 y las actuaciones precisadas a corto plazo.

Lamentablemente estos objetivos, en particular los referentes a los 300 kg/habitante/año referentes a los RSU, han sido ampliamente superados puesto que en 2005 esta tasa casi se dobló.

En el punto 2 del DVD adjunto aparece un análisis sobre la prevención de riesgos laborales en el sector de la recuperación de residuos.

Tabla 2.9. Gestión de residuos para un desarrollo sostenible.

	Objetivos genéricos	Objetivos para el año 2000	Actuaciones
RSU	• Uso racional y sostenible de los recursos. • Prevención (cerrar ciclos). • Reciclaje y máxima reutilización. • Eliminación segura una vez reciclado y reutilizado, de acuerdo con la prioridad. • Aprovechamiento como combustible: incineración, vertido.	• Planificación de la gestión. • No superar 300 kg/hab/año • Reciclaje de, como mínimo, el 50% de la fracción inorgánica. • Prever la infraestructura de recogida y tratamiento. • No exportar fuera de la UE para su eliminación. • Crear mercados de los productos reciclado. • Reducción de la emisión de dioxinas.	• Directiva sobre vertederos. • Directiva sobre envases y embalajes. • Diseño de producto. • Datos fiables de producción y eliminación. • Establecer un régimen de responsabilidades. • Crear incentivos económicos. • Normas de emisiones para la incineración.
IR + TTP	• Prevención de residuos (cerrar ciclos). • Reciclaje y máxima reutilización. • Eliminación segura, una vez reciclado y reutilizado, de acuerdo a la prioridad. • Aprovechamiento como combustible: incineración, vertido.	• No exportar fuera de la UE para su eliminación. • Planificación de la gestión. • Infraestructura comunitaria de recogida y tratamiento • Mercado de productos reciclados.	• Directiva sobre vertederos. • Directiva sobre la incineración de residuos tóxicos. • Tecnologías limpias • Estadísticas fiables sobre producción. • Establecimiento de Bolsas de Residuos. • Inventario de riesgos. • Crear incentivos económicos.

10. Vertido y Ciclo de Vida

El aumento en el consumo y la generación de residuos ha disparado la producción *per capita* de residuos a valores hasta ahora insospechados. La solución más rápida ha sido el vertedero. A ello se ha opuesto, de manera decidida, la Unión Europea a través de su V Programa de Acción Comunitaria en lo concerniente a la gestión de residuos, donde se insta a los diversos estados miembros a que penalicen la acción de verter. Ello es una manera de fomentar el reciclaje.

En 1996 el Consejo de la UE invitó a la Comisión a redactar un borrador de Directiva referente a los vertederos donde se hablaba de pretratamiento, codisposición, clausura, costes, etc., que difícilmente podrían ser aceptados por algunos estados. Así por ejemplo, en lo concerniente a la gestión de residuos, se citan como residuos que no podrán ser aceptados en los vertederos:

- Residuos con un contenido de carbono orgánico superior al 10%. Este punto entraría en vigor en algunos países 5 años después de ser aceptada la directiva.
- Residuos líquidos (en vigor en el plazo de 2 años).
- Residuos sanitarios.
- Neumáticos usados (de inmediato) o los triturados (5 años, que se cumple en 2006).

Estas medidas, junto con las económicas (los costes deberán cubrir los gastos de explotación, tratamiento de gases y lixiviados, cierre y vigilancia de post-clausura durante 30 años) conducirán a una evidente restricción en el uso de los vertederos. En la vertiente ambiental, los ACV aplicados a los vertederos, en particular a los vertederos de RSU, han puesto de manifiesto que, aun en la hipótesis de usar vertederos controlados, el impacto ambiental que generan es muy importante. Los ACV concluyen que el mayor impacto ambiental de las emisiones proviene de la biodegradación de los residuos fermentables. Así se puede estimar que el efecto invernadero que generan las emisiones se podría reducir en un 50% en caso de recuperar el biogás producido. El otro gran problema ambiental lo constituyen los lixiviados y los efectos que podrían ocasionar a largo plazo. La Figura 2.21 reproduce el diagrama de flujos correspondiente a un vertedero de RSU controlado.

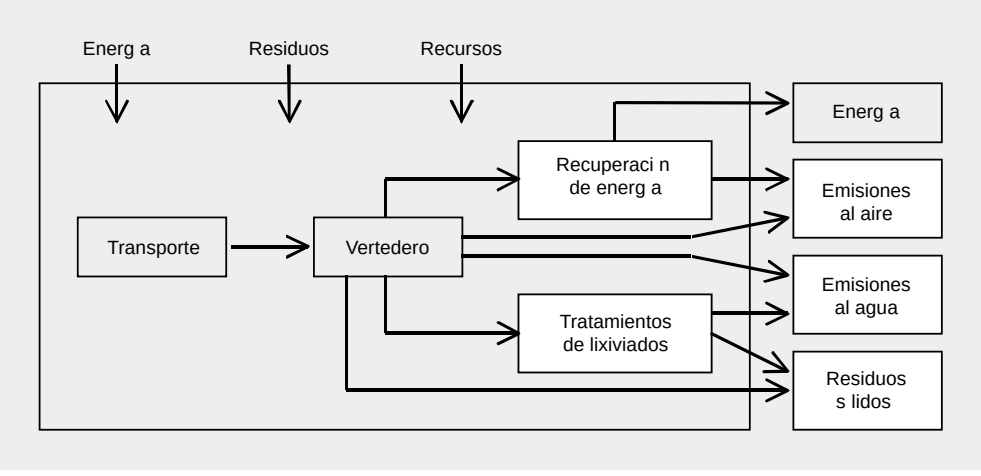


Figura 2.21. Diagrama de flujo de un vertedero controlado de residuos.

11. La Agenda 21

Los planteamientos de sostenibilidad encuentran en la dimensión local (municipalidades) un marco idóneo para su desarrollo de forma operativa, pragmática, tangible y perceptible para la sociedad.

Para poner en marcha un proceso de Agenda 21 Local es importante mostrar la capacidad de escuchar, de percibir la necesidad de los agentes sociales y las implicaciones en el vector ambiental (facilitando el

desarrollo de los planes, programas, acciones y actuaciones de forma sostenible). Toda Agenda 21 contempla aspectos ambientales, pero también, de forma intrínseca e inexcusable, aspectos sociales y económicos. La participación en las fases del proceso Agenda 21 constituye un factor determinante de su éxito.

Hoy se entiende por Agenda 21 Local, un proceso en el que las autoridades locales trabajan en asociación con todos los sectores de la comunidad, para unificar criterios y preparar un Plan de acción responsable en bien del municipio, que permita aplicar los pilares de la sostenibilidad a escala local.

Conviene recordar que, de hecho, la realización del proceso de Agenda 21 Local, no constituye un nuevo trabajo a añadir a la lista de las actividades que precisa la gobernabilidad del municipio. En sí misma la Agenda 21 Local constituye el punto de partida para llevar a cabo la gobernabilidad de forma equilibrada, entendedora, participada e integradora... es decir, de forma sostenible.

La Agenda 21 se basa en el principio de que el desarrollo sostenible no es solamente una opción, si no un imperativo, tanto en los aspectos ambientales, como en los sociales, económicos y de organización territorial (país, comarca, municipio). Es difícil, pero posible. Requiere un gran cambio en las prioridades de los gobiernos y de las personas, puesto que implica la total integración de la dimensión ambiental, en las políticas económicas y la toma de decisiones en todos los campos de la actividad y un gran despliegue de recursos humanos y financieros a escala local.

Lo realmente necesario y al propio tiempo no siempre fácil es encontrar los medios para ejercer las presiones capaces de producir un progreso real, así como de desarrollar un sentimiento de urgencia para seguir adelante. Esto sólo pasará cuando el desarrollo sostenible sea considerado como el único modelo de desarrollo económico válido para el futuro y sea plenamente aceptado por todos los agentes. Entonces se estará en el camino de un progreso real. Toda presión en este sentido es poca y no se puede perder de vista esta urgencia para avanzar por este camino. Por tanto, la Agenda 21 más que una herramienta es un estilo de vida, un camino a recorrer entre todos los ciudadanos.

Las empresas, y/o centros de producción son un elemento clave en el desarrollo de la vida de un municipio y es por ello, que se exponen las diferentes relaciones que pueden surgir entre ellas y la Agenda 21 del Municipio a que pertenecen.

Desde una perspectiva global, interconectada y con relaciones multilaterales se retoma la posición local, de relación próxima con los recursos naturales, enfocada al nivel de centro de actividad donde las medidas y actuaciones medioambientales tienen un mayor trato y aparece más pragmática la actuación de mejora ambiental y por extensión de sostenibilidad.

Es en este sentido que se analizarán las diversas relaciones de la empresa con la Agenda 21 local (A21). Así pues, se puede considerar:

- El plano global: el desarrollo sostenible un contexto para la empresa.
- Del plano global a la escala local: la empresa y la Agenda 21 Local.
- Relación empresa y Agenda 21.
- Relación Agenda 21 y Empresa.

11.1. EL PLANO GLOBAL: EL DESARROLLO SOSTENIBLE UN CONTEXTO PARA LA EMPRESA

Las ideas de desarrollo sostenible son acogidas, cada vez más, por muchas instituciones y entidades. Tan diversa es su acogida como su definición y evidencia la conciencia de que la situación actual es insostenible. Se manifiesta una sobrecarga de los ecosistemas, la proximidad a situaciones de conflicto por las tensiones que provoca la desigualdad existente y la cultura del exceso en ciertas situaciones contrapuesto a objetivos, deseos tan loables como posibles, de la Cumbre de la Tierra (Johannesburg 2002) que propone «reducir a la mitad, en el 2005, la proporción de personas que no tienen a su alcance agua potable». Lamentablemente, en 2006 la problemática sigue igual.

La situación marcada hacia un desarrollo sostenible comportará, con toda seguridad, tensiones en el comportamiento y forma de actuar de la empresa. Hará falta explicar y comunicar sus actuaciones informando del uso de los bienes naturales y el grado de utilización de los recursos tanto en la empresa como en el consumo de sus productos. El sistema informativo precisa de una contabilidad que soporte el rol de comunicador, informando a los agentes de interés de la empresa y a sus responsables de cómo hace esta utilización de recursos medioambientales. Y todo ello por cualquiera de las dos vías descritas; incluyendo y ampliando el alcance del ámbito financiero actual o implicándose en la elaboración de la

memoria de indicadores de sostenibilidad y, entre ellos los medioambientales.

> La actuación de la empresa en el contexto del siglo XXI asume un nuevo riesgo: *no ser sostenible.*

Es preciso recordar que el ámbito medioambiental, como nueva disciplina, es de permanente estudio. ¿Se dispone de un plan para la gestión de catástrofes? No parece una idea atrevida disponer de un plan que ponga de manifiesto los aspectos de gestión de este riesgo, de forma convencional, en las diversas fases: prevención, preparación, mitigación del daño, respuesta rápida y adecuada y recuperación o reparación del daño por referencia al incumplimiento de las exigencias derivadas del nuevo riesgo*: ser sostenible.*

Pasar del estadio de las ideas al nivel de las acciones nunca ha sido un proceso fácil y la actividad empresarial conoce bastante bien estas dificultades. Se puede afirmar que el desarrollo sostenible es una buena idea, una necesidad y un problema, pero que se corresponde a un problema de otros.

El concepto se sitúa en una órbita a nivel planetario que escapa al alcance de la acción de la empresa. Un problema que precisa de un acuerdo de autoridades mundiales necesita de un marco global y multilateral (abierto a diferentes interlocutores) y surge el interrogante:

¿Como afecta a la empresa?, ¿Que se puede hacer respecto al objetivo «f» de la Cumbre de la Tierra (Johannesburg 2002) que fija:

> f) Promover la responsabilidad corporativa y la rendición de cuentas de las empresas y el intercambio de prácticas más eficientes en el marco de desarrollo sostenible.

Aparte de todo el esfuerzo que supone poner en marcha un cambio de paradigma económico y social con los problemas de debate y definición que esto supone, implica un cambio de cultura pues, en última instancia, se plantea que «algunos vivan más sencillamente para que otros puedan simplemente vivir».

De una preocupación del factor ambiental, la gestión de recursos naturales en el más amplio sentido del término, la sostenibilidad descansa en factores sociales y culturales. Tres de las cinco áreas de debate y acuerdo de la Cumbre de la Tierra vienen directamente relacionadas con temas de comportamiento social: pobreza, protección y salud, y modificación de modos de consumo y producción acompañan a la protección y gestión de recursos naturales y la globalización del comercio.

Si bien a nivel planetario no aparecen soluciones mágicas de alcance universal, se puede constatar que se mantiene la preocupación, la tensión y atención propias de un problema no resuelto.

La similitud con la actividad de las pymes en este debate, parece distante pero no resulta así al situarse en un plano más próximo: la escala local. Existe la creencia que la proximidad al problema es un buen remedio para tratar de solucionarlo y así sucede en el ámbito de la sostenibilidad cuando se trabaja a nivel local tal y cómo se verá a continuación.

11.1.1. Del plano global a la escala local: la empresa y la Agenda 21

El aprendizaje de los temas medioambientales y de sostenibilidad, en Cataluña, se sitúa en un enfoque de transversalidad, es decir, trata de un tipo de conocimiento aplicable a muchas decisiones y a prácticas de problemas resueltos técnicamente que precisan de una revisión. No se enfoca a un área de conocimiento aislada que genera conocimiento y estudio por sí misma. El desarrollo sostenible y el respeto medioambiental son áreas de conocimiento para aplicarse a la práctica cotidiana con ánimo de orientación a una situación diferente de la actual.

Han sido los gobiernos locales quienes han recogido el reto de la sostenibilidad y, en la más pura tradición de pensar globalmente y actuar localmente, han iniciado los procesos de Agenda 21 que han tenido un rápido crecimiento y difusión.

En pocas palabras, la Agenda 21 reflexiona sobre el territorio (municipio, región, nación) y por medio de un estudio previo (diagnosis inicial) detecta los parámetros medioambientales del territorio, para hacer y aprobar, a través de un proceso de participación ciudadana, unas directrices de actuaciones medioambientales y sociales económicamente viables para servir de guía de las actuaciones de los habitantes del territorio (incluidas empresas y entidades). Establece un Plan de Acción a largo plazo, con revisiones periódicas, y lo hace por medio de un sistema de indicadores de los ámbitos ambiental, social y económico, que le permiten seguir su evolución, al propio tiempo que consigue cambiar prioridades según los sucesos ocurridos en el Municipio.

El guión de la Agenda 21, partiendo de unos objetivos, permite el desdoblamiento de planes de acción. Es el inicio de un camino donde se evalúa periódicamente su ejecución y se revisan con la cadencia que se crea conveniente. Con la correspondiente información periódica a la ciudadanía (habitantes, empresas, instituciones). Proceso donde la participación ciudadana está siempre presente.

Para la empresa o centro de producción ubicado en un territorio donde se haya puesto en marcha el proceso de Agenda 21, éste constituye un nuevo ingrediente, un nuevo marco de actuación en una doble vertiente:

- Como ente que forma parte de la colectividad.
- Cómo agente impulsor de actividades relacionadas con el medioambiente, que pone en práctica las directrices de la propia A21.

11.2. RELACIÓN EMPRESA Y AGENDA 21

Al planificar una estrategia sostenible, la empresa necesita hacer, y desarrollar un modelo dinámico que tenga en cuenta estos parámetros:

- *Los requerimientos y necesidades del entorno físico-geográfico* al que pertenece y las diferentes necesidades, expresadas en la Agenda 21 porque de esta situación se derivan oportunidades y amenazas, para la propia gestión de la empresa.
- *Capacidades medioambientales competitivas.* Las empresas cuentan con capacidades de las cuales se pueden extraer ventajas competitivas, al propio tiempo que, de forma socialmente responsable, las pueden poner al alcance de las Administraciones competentes para el desarrollo de la Agenda 21. En este ámbito tanto los centros de producción como las empresas son entes que pueden tener un peso específico considerable para conseguir una participación económica y social importante.
- *Estrategia medioambiental.* Teniendo en cuenta la realidad externa, los requerimientos y necesidades del municipio, comarca, región... y las necesidades internas de la empresa. Hace falta que la empresa defina su estrategia medioambiental, intentando que vaya encaminada a planificar el desarrollo y potenciación de sus capacidades de cambio y, en cierta manera, influir, participando, en la futura configuración del entorno al que pertenece.

11.3. INTERACCIÓN AGENDA 21 Y EMPRESA

Cuando la Administración planifica su estrategia para iniciar el proceso de Agenda 21, le hace falta considerar de forma clara y precisa los parámetros y actividades que espera de las empresas, precisando la tipología de las empresas según las características de tamaño, sector, ubicación, posición y la importancia relativa de su actividad en el sistema.

Esta preocupación por la participación de las empresas, refiriéndose a entidades radicadas en el territorio y afectadas por la A21, es una constante en la metodología a seguir en el proceso y en todas y cada una de sus fases.

La administración y los organismos creados por la A21 convienen que tengan en cuenta las capacidades de actuaciones medioambientales y de sostenibilidad que tienen las empresas. Deberían saber como llevan a cabo su plan de desarrollo y cuales son sus mejoras y ventajas, para facilitar la actuación conjunta y participada en todas las etapas del proceso.

La Administración, sea del nivel que sea, y a través de la legislación y requerimientos legales, tal vez es la fuerza medioambiental que mas influencia directa tiene en las actuaciones de las empresas. El objetivo último de estas disposiciones no es otro que conducir a las organizaciones empresariales a internalizar los costes, es decir, dejar de considerar los impactos al medio como simples externalidades. Importante es la forma como la empresa afronta estos retos. Si unas se han dedicado a combatir la legislación (empresa reactiva) otras son capaces de convertir los retos en oportunidades, las empresas proactivas.

Una consolidación interna, a escala de unidad jurídica, permite determinar el resultado a nivel de

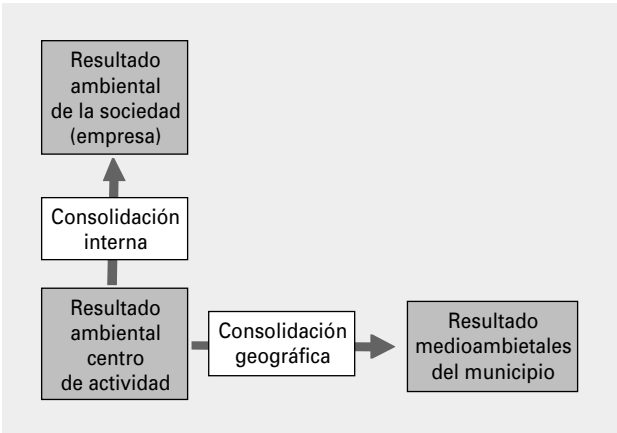


Figura 2.22. Centro de actividad. Relación empresa/municipio.

empresa donde se establece el compromiso medioambiental. La segunda línea de consolidación es más difícil pero no por ello menor: la consolidación a escala territorial, a nivel de municipio donde la importancia del comportamiento ambiental del centro de producción es más próxima, más importante y puede seguirse y completarse con una actuación municipal adecuada.

No hace falta decir que la proclamación de Agendas 21, como expresión de la voluntad municipal de gestionar un territorio de forma sostenible, tendrá una parte importante en la valoración del comportamiento del centro de producción de la empresa ubicada a su municipio.

El resultado agregado de todos los centros de actividad de un municipio permitirá el control de la efectividad de las actuaciones en materia de sostenibilidad y la propia definición de la Agenda 21 servirá para fijar los indicadores de valor de la mayoría de las valoraciones de los impactos ambientales y, aun sociales, de la empresa.

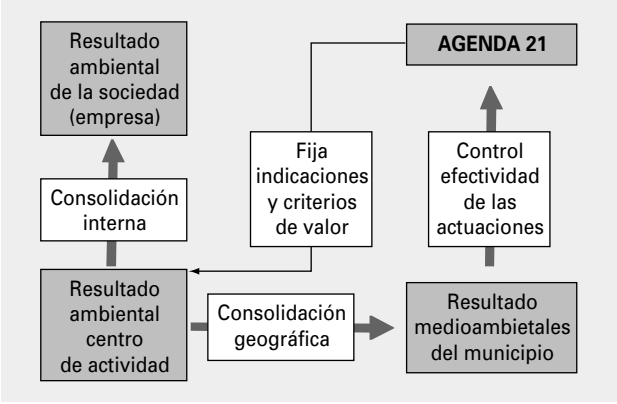


Figura 2.23. El resultado de la Agenda 21.

Dicho de otra manera, la Agenda 21 Local constituirá un referente valorativo de los impactos ambientales de la actividad empresarial, a la vez que se verá reforzada por la publicación de los resultados de los centros situados al principio, cerrando de este modo el círculo básico de la sostenibilidad: ciudadano-empresa.

11.4. DEL PLANO LOCAL A LA RESPUESTA INDIVIDUAL

Frente a esta nueva situación: ¿como responde la cuenta de resultados de la empresa? Cambiando:

- Haciéndose menos preciso pero de alcance más amplio,
- Capaz de dar cuantificaciones al análisis coste/beneficio,
- Investigando que le supone para la empresa una actitud proactiva, medioambientalmente hablando.

A la descripción de ingresos y gastos con reflejo a tesorería el cómputo de resultados toma más ámbitos y aparecen nuevas formas de descripción con que recoger las consecuencias de los impactos medioambientales. Los grandes apartados que haría falta recoger, se encuentran listados en la Tabla 2.10 agrupados en cuatro apartados:

- *Directos de gestión*. Con repercusión a las cuentas de tesorería.
- *De responsabilidades futuras*. Con incidencia monetaria probable a ejercicios posteriores. Los costes, aplicando el principio de prudencia se anotan, se recogen en lugar de provisiones. No tienen reflejo los ingresos por este concepto en las cuentas de resultados.
- *Ocultos de gestión*. A menudo etiquetados en conceptos de ingresos y gastos que corresponden a otras clasificaciones donde la relación medioambiental queda relegada a un segundo término. Los ingresos ocultos no son reconocidos como tales por la contabilidad; ésta anota el consumo después del ahorro proporcionado.
- *Intangibles*. No descritos por el sistema contable clásico, su evaluación no se deriva de anotaciones monetarias. Existen, se hacen notar a través de otros hechos y conjuntamente con ellos, razón por la cual a menudo pasan desapercibidos. Su identificación es posible pero no tienen las dosis de objetividad que precisa el contable en su descripción de cuentas anuales.

Sin ánimo de ser exhaustivos, la Tabla 2.10 hace referencia a los elementos más frecuentes de esta cuenta de resultados medioambientales.

¿Conviene dudar hacia donde se inclinará la balanza de costes e ingresos?

Sin duda dependerá de muchos factores pero la creencia es que un análisis completo y una cuantificación prudente, induce a creer que serán más los ingresos que los costes.

En el reto que supone asumir el riesgo de «no ser sostenible» tiene cabida la cuantificación de los elementos aportados en esta tabla, pero: ¿Estamos

Tabla 2.10. Aspectos económicos que recoge la Agenda 21.

Resultados medioambientales	
Costes	**Ingresos**
Costes directos de gestión • Mantenimiento de las instalaciones (específicas). • Recogida, transporte y tratamiento de residuos. • Transporte y eliminación de desechos y residuos. • Seguros daños ambientales. • Costes de formación. • Costes dE acceso a la información. • Impuestos, cánones y tasas específicas.	*Ingresos directos de gestión* • Acceso a nuevos mercados donde se aprecie el comportamiento medioambiental del producto (compra verde). • Venta de residuos valorizados. • Ayudas y subvenciones por acciones medioambientales. • Reducción del coste primas de seguros. • Venta de tecnología y o información del proceso medioambiental. • Asesoramiento en temas medioambientales. • Mejor potencial de calidad del producto (más valor añadido).
Costes de responsabilidades futuras • Saneamiento de espacios contaminados. • Contribución a saneamiento de infraestructuras. • Restitución y compensación por daños. Salud y ecosistemas. • Costes jurídicos.	*Ingresos de responsabilidades futuras* • Mejor valor en casos de venta, liquidación y fusión al no tener pasivos medioambientales. • Acceso a mercados financieros en mejores condiciones (menos riesgo menos coste). • Menos dotación de provisiones por reparación y compensación de daños.
Costes ocultos de gestión • Más costes de producción para reducir efectos contaminantes. • Costes medibles de adecuación y cumplimiento de normas. • Trámites burocráticos de gestión (básicamente deshecho y residuos). • Coste de obtención de permisos.	*Ingresos ocultos de gestión* • Ahorro de consumos por pieza (desmaterialización producto y proceso). • Menos gastos de gestión de deshecho y residuos. • Menos horas de gestión. • Menos provisiones por incumplimientos.
Costes intangibles • Riesgo de la empresa por pasivos medioambientales. • Complica las relaciones con trabajadores y sindicatos. • Publicidad negativa. • Oposición social a las instalaciones. • En posición negativa respecto a los competidores directos. • Coste de no actuar.	*Ingresos intangibles* • Motivación más alta de la plantilla (menos riesgo, más confort, más responsable ambiental). • Imagen corporativa «limpia». • Ausencia de conflictos medioambientales. • Mejor credibilidad de la empresa. • Apreciación social favorable de la empresa y empresario. • Mejor capacidad derivada del conocimiento. • Buena posición que permite un mejor diferencial de competitividad.

seguros de calibrar los factores de ingresos de forma adecuada? No es de extrañar que sorprenda la magnitud de los ingresos. Si los costes ambientales son reconocidos no suele acontecer lo mismo con las elementos de beneficio y conviene realizar de forma integra el análisis coste-beneficio.

Bibliografía

ALMENAR, R *et al*. *La sostenibilidad del desarrollo: El caso Valenciano.* Fundació Bancaixa. València 1998.

AGENCIA EUROPEA DEL MEDIO AMBIENTE. Environmental assesment. *Report*, n.º 2. 1999.

AJUNTAMENT DE BARCELONA. *Manual de Planificación para la Agenda 21 Local: una introducción a la planificación para el desarrollo sostenible.* 1996.

ARIZMENDI, L. J. *Instalaciones urbanas: Infraestructura y planeamiento*. Tomo I. Bellisco. Madrid.

BARTLETT, K. L., LESTER, R. R. y POJASEK, R. B. Prioritizing P2 Opportunities with Activity-Based Costing. *Pollution Prevention Review*. 1995. Autumn pp. 17-26.

BETZ, M. PVC Recovery options: Environmental and Economic systems analysis. *Cost Action* 530 Training School on «Waste Management and LCA» in Schopool (Bulgaria), Septiembre de 2005.

BRENNEMAN, D. R. y Hattaway, D. R. (1995). Incorporate pollution prevention into your business plan. *Hydrocarbon Processing*. 1995. August pp. 84-86.

CAR/PL / PAM (2004) *Estado de la producción más limpia en los países del plan de acción para el mediterráneo*. 2.ª edición.

CEMA (1999). *DAOM. Diagnosis Ambiental de Oportunidades de Minimización.*

COMISIÓN DE LAS COMUNIDADES EUROPEAS. Communication from the commission to the council, the european parliament, the european economic and social committee and the committee of the regions: Taking sustainable use of resources forward: A Thematic Strategy on the prevention and recycling of waste, (COM(2005) 666 final, de 21-12-2005).

DÍAZ, A. y RAMOS, A. La práctica de las estimaciones de impactos ambientales. Fundación Conde del Valle de Salazar. ETSIM. Madrid, 1987.

DIRECCIÓ GENERAL DE QUALITAT AMBIENTAL. Les emissions a l'atmosfera a Catalunya. Una aproximació quantitativa. *Quaderns de Medi Ambient*. Barcelona, 1994.

DOMENECH, X., RIERADEVALL, J. *Aprofitament energètic dels residus en abocadors*. ICAEN. Barcelona, 1995.

EHRENFELD, J. y GERTLER, N. (1997). Industrial ecology in practice: the evolution of interdependece at kalundborg. *Journal of Industrial Ecology*. 1997. V. 1. N.º 1, pp. 67-79.

EKVALL T. y FINNVEDEN, G. Allocation in ISO 14041 – A Critical Review. *Journal of Cleaner Production*. 2001. V. 9, pp. 197-208.

ELIAS, X. *La gestión de residuos a debate interdisciplinar*. Ed. Ategrús. Bilbao, 1994.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (1988). *Environmental Management Tools for SMEs: A Handbook*. Ed. R. Starkey. Copenhagen. http://www.eea.eu.int

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. Cleaner Production.

FOX, R. D. *Pollution Control at the Source.* Chem. Eng. August 6, pp. 72-82 (1973).

FULLANA, P. y PUIG, R. *Análisis del ciclo de vida*. Ed. Rubes. Barcelona, 1998.

FULLANA, P. A*nálisis del ciclo de vida: actualización*. Editorial AENOR, Madrid (en redacción).

FULLANA, P. y PUIG, R. *Análisis del ciclo de vida*. Ed. Rubes, Barcelona, 1997.

FULLANA, P., FRANKL, P. y BAITZ, M. Life cycle considerations on Waste Oils and implications and recommendations for public policy (in response to the Consultation issued by the EC DG Environment on the Directive 75/439/EEC on waste oils), informe final realizado por la Escola Superior de Comerç Internacional (UPF) para GEIR (Groupement Européen de l'Industrie de la Régération), Barcelona, abril de 2006.

FULLANA, P., GAZULLA, C., MILÀ, L., PUIG, R. y XICOTA, E. Adaptación metodológica del ACV orientada a la aplicación. En: Clemente, G., Sanjuán, N., Vivancos, J. L. (Eds.) *Análisis de ciclo de vida: aspectos metodológicos y casos prácticos*. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia 2005.

GENERALITAT DE CATALUNYA. Departament de Medi Ambient. 1999. *DAOM. Diagnosis Ambiental de Oportunidades de Minimización.*

Guías MOPU. *Metodologías para la elaboración de estudios de impacto ambiental*. Ministerio Obras Públicas. Madrid.

HAMMER, B. Management accounting: The hidden driver for clean production. http://www.cleanerproduction.com/papers/MgtAcctgandP2.htr (1998).

HERKERT, J. R., FARRELL, A. y WINEBRAKE, J. J. Technology choice for sustainable development. *IEEE Technology and Society*. 1996. 15(4), pp. 11-20.

http://service.eea.eu.int/envirowindows.

http://www.britglass.org.uk/newsevents/BGNewsArchive/IndependentLCAforGlassRec.html

http://www.kupfer-institut.de/front_frame/index.php

http://www.world-aluminium.org/environment/lifecycle/lifecycle3.html

HULPKE, H. y MÜLER -EISEN, U. The Prevention principle. environmental protection integrated in production processes. *Environ. Sci. & Pollut. Res*. 1997. 4(3), pp. 146-153.

ICC (Cámara Internacional de Comercio) (1988). *Environmental Auditing*. París.

INSTITUTO CERDÁ. *Manual de minimización de residuos y emisiones gaseosas*. Vol. I, II y III. Ed. Ingoprint, SA.

ISO 14001 (1996). *Sistemas de gestión medioambiental. especificaciones y directrices para su utilización*.

ISO 14041 (1998). *Life cycle assessment*. Ginebra.

LAFORGA, M. *La gestión de residuos: Una necesidad que puede ser un negocio*. IMPI. Ministerio de Industria. Madrid.

LEFEBVRE, E., LEFEBVRE, L. A. y TALBOT, S. *Life cycle design approach in SMEs.* Int. J LCA 6. 2001. (5) 273-280.

LEROY, J. B. *Los desechos y su tratamiento*. Fondo de Cultura Económica. México, 1987.

LUYBEN, P. D. y BAILEY, J. S. Newspaper recycling: the effects of rewards and proximity of containers. *Environmental and Behavior*, vol. 10, 1979.

MORENO, L *et al. Biotecnología y sociedad. Percepción y actitudes públicas*. MOPT 1992.

OECD. *Tools for evaluating pollution prevention opportunities.*

OLSTHOORN, X., TYTECA, D., WEHRMEYER, W. y WAGNER, M. (2001). Environmental indicators for business: a review of the literature and standardisation methods. *Journal of Cleaner Production* 9, pp. 453-463.

ONTARIO WASTE MANAGEMENT CORPORATION (1987). *Industrial Waste Audit and Reduction Manual.*

ONU. División de desarrollo sostenible. Agenda 21. http://www.un.org/esa/sustdev/agenda21text.htm.

PNUMA (UNEP) (2001). Cleaner production-key elements. http://www.unepie.org/pc/cp/home.htm.

PAVAN, M *et al. Iindicatori di sostenibilità nell' ambito del processo di Agenda 21 locale per Venezia*. Fondazione Eni Enrico, Mattei. 1996.

PUIG, R., MILÀ, L. y FULLANA, P. 1. Què és una ACV?: metodologia. En: Puig, R. (ed.) *Llibre didàctic d'anà-*

lisi del cicle de vida (ACV), Xarxa Temàtica Catalana d'ACV y Departament de Medi Ambient (Generalitat de Catalunya), Barcelona 2002.

RIERA DE VALL, J. y VINYETS, J. *Ecodiseño y ecoproductos.* Ed. Rubes. Barcelona, 1999.

ROYSTON, M. G. *Pollution Prevention Pays*. Pergamon Press, New York, 1979. Proceedings of the International Symposium on Clean Technologies, Karlsruhe, 1985.

UNEP. *Waste Minimization. Industry and Environment*, vol. 12, n.º 1 (1989).

UNIÓN EUROPEA. *Reglamento (CE) N.º 761/2001 del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de marzo de 2001 por el que se permite que las organizaciones se adhieran con carácter voluntario a un sistema comunitario de gestión y auditoría medioambientales (EMAS*). DO L 114/1. 2001.

USEPA (1988). *Waste minimization opportunity assessment handbook*. EPA 625/7-88-003.

USEPA (1995). *An introduction to environmental accounting as a business management tool: key concepts and Terms*. USEPA 742/R/95-001.

VAN BERKEL, R., WILLEMS, E. y LAFLEUR, M. The relationship between cleaner production and industrial ecology. *Journal of Ind. Ecology*, 1997. V. 1, N.º 1, pp. 37-49.

VAN HEMEL, C. y CRAMER, J. (2002). Barriers and stimuli for ecodesign in SMEs. *Journal of Cleaner Production,* 2002. 10, pp. 439-453.

VELEVA, V. y ELLENBECKER, M. (2001). Indicators of sustainable production: framework and methodology. *J. of Cleaner Production*, 2001. 9, pp. 519-549.

VON WEIZSÄCKER , E. U., LOVINS, L. H.y LOVINS, A. B. *Factor 4*. Círculo de Lectores. Barcelona, 1997.

WBCSD. *Eco-efficiency. Creating more value with less impact*. 2000.

WHITE, P *et. al. Integrated solid waste management: a lifecycle inventory*. Blakie Academic and Professional. Londres, 1995.

WILCOX, B. A. Defining sustainable development. *Environ. Sci. Technol*, 1992. Vol. 26, n.º 10, p. 1902.

WILLUMS. J. O. *From ideas to action*. Cámara de Comercio Internacional. Ed. ICC Publication. ISBN 92-842-1141-7.

WOODWARD, J. *Management and technology.* HMSO. También en Pugh. D. S. *Organization Theory. Selected Readings*. 1958.

Tecnologías aplicables al tratamiento de residuos. Valorización y fabricación de materiales a partir de residuos

3

Xavier Elias, Jordi Garcia, Marga López, Montserrat Soliva

ÍNDICE

1. Introducción y definiciones relativas al tratamiento de residuos 93
1.1. Toxicidad y reciclaje 94
2. Selección del proceso de tratamiento 96
2.1. Naturaleza del residuo 96
2.2. Objetivo del tratamiento 97
2.3. Adecuación técnica de las diversas alternativas 97
2.4. Consideraciones económicas 98
3. Tecnologías aplicables al reciclaje multidisciplinar 98
4. Técnicas físicas 99
4.1. Absorción 99
4.2. Adsorción 100
4.3. Intercambio iónico 103
4.4. Separación de líquidos inmiscibles 104
4.5. Destilación 105
4.6. Evaporación 106
5. Técnicas químicas 108
5.1. Precipitación química 108
5.2. Hidrólisis 110
5.3. Oxidación química 110
5.4. Reducción química 111
5.5. Oxidación húmeda 111
5.6. Fotocatálisis 116
5.7. Sonoquímica 117
6. Técnicas fisicoquómicas 118
6.1. Técnicas de arrastre 118
6.2. Ceramización y encapsulación 118
6.3. Cavitación hidrodinámica 122
6.4. Vitrificación 123
6.5. Estabilización y solidificación 126
6.6. Comparación entre tratamientos fisicoquímicos 128
7. Técnicas energéticas 136
7.1. Procesos térmicos y tratamiento de residuos 136
8. Técnicas biológicas 137
8.1. La codigestión anaerobia 138
8.2. La pasteurización 139
8.3. Filtros biológicos para la desodorización 140
9. Sistemas mixtos 140
9.1. El proceso de fangos activados 141
10. Regeneración de disolventes usados 144
10.1. Tratamiento de disolventes clorados ligeros 145
10.2. Extracción de disolventes 145
11. Tratamientos de compuestos volátiles 146
11.1. Sistemas de minimización del impacto oloroso 146
12. Tratamientos para la recuperación de metales 149
12.1. Sistemas microbiológicos para la recuperación de metales 149
13. El compostaje. Proceso de tratamiento aerobio 150
13.1. Fabricación de compost 152
13.2. Fases del proceso de compostaje 153
13.3. Tratamiento de las sustancias patógenas presentes en los RSU 155
13.4. Higienización del compost 155
13.5. Materiales obtenidos a partir del tratamiento mediante compostaje de RSU: abono, enmienda orgánica y sustrato 157
13.6. Aplicación del compostaje a los fangos resultantes de la depuración de aguas residuales 157

14. La metanización. Proceso de tratamiento aerobio 161
14.1. Variantes de la metanización 164
14.2. El tratamiento de los biogases procedentes de sistemas de conversión energética 165
14.3. Valorización del gas de vertedero 167

15. Resumen de las tecnologías aptas para el reciclado de residuos 167

16. Tipologías de residuos y tecnologías aplicables al reciclaje 169

Bibliografía 169

RESUMEN

Esta sección pretende desarrollar algunas de las tecnologías disponibles que pueden ser aplicables a los procesos de reciclado de residuos. La finalidad de este capítulo consiste en considerar el tratamiento como una etapa puente que, partiendo de la inertización del residuo, lo transforma y lo valoriza en un material útil o reciclado.

El capítulo pasa revista a las tecnologías para el tratamiento y valorización de residuos más usuales y otras más novedosas como puede ser la ceramización o la vitrificación.

Asimismo, también se estudian las tecnologías basadas en los procesos anaeróbios y el compostaje en particular como técnica de reciclaje de los residuos orgánicos, dada su enorme importancia y trascendencia actual.

1. Introducción y definiciones relativas al tratamiento de residuos

La USEPA (*United States Environmental Protection Agency*, o Agencia Medioambiental de EE UU), entiende por tratamiento de residuos cualquier método o procedimiento que modifique el carácter químico, físico y/o biológico de un residuo con el fin de convertirlo en inerte, menos peligroso o que pueda ser manipulado con más seguridad.

Por otra parte, la Ley 20/1986, de 14 de mayo, Básica de Residuos Tóxicos y Peligrosos (vigente hasta 12 de mayo de 1998), estableció el régimen jurídico básico para que en la producción y gestión de los residuos tóxicos y peligrosos se garantice la protección de la salud humana, la defensa del medio ambiente y la preservación de los recursos naturales, así como facilitar el transporte, almacenamiento, eliminación y recuperación de los recursos contenidos. Posteriormente, de acuerdo con lo estipulado en su disposición adicional primera el Gobierno dictó el Reglamento para su ejecución, aprobado por Real Decreto 833/1988, de 20 de julio. Ambas disposiciones incorporaban al ordenamiento interno español la Directiva 78/319/CEE, del Consejo, de 20 de marzo, relativa a los residuos tóxicos y peligrosos.

La experiencia adquirida en la aplicación de los mandatos de la Directiva 78/319/CEE en los países miembros de la Unión Europea mostró la existencia de diversas carencias y la conveniencia de arbitrar nuevas medidas para mejorar la gestión y eliminación de dichos residuos. Consecuentemente el Consejo de la Unión Europea aprobó la Directiva 91/689/CEE, de 12 de diciembre, relativa a los residuos peligrosos, disposición que deroga expresamente la Directiva 78/319/CEE. Posteriormente, y según lo previsto en el Apartado 4 del Artículo 1 de la nueva Directiva, el Consejo aprobó la lista comunitaria de residuos peligrosos, mediante la Decisión 94/904/CE, de 22 de diciembre.

La incorporación de la Directiva 91/689/CEE exige modificar y complementar determinados preceptos del Reglamento para la ejecución de la Ley 20/1986, a cuyo fin se dicta el Real Decreto 952/1997, de 20 de junio, por el que se modifica el Reglamento anteriormente mencionado. Igualmente, la Ley 20/1986 habilita al Gobierno en su disposición adicional segunda para modificar la relación de sustancias tóxicas y peligrosas contenidas en su anexo y para complementarla con el establecimiento de las cantidades y concentraciones significativas para las sustancias incluidas en la misma.

De acuerdo con esta habilitación, en el Real Decreto 952/1997 se sustituye dicha relación por las sustancias que figuran en la Directiva 91/689/CEE, estableciéndose su presencia en las cantidades y concentraciones significativas para que los residuos puedan ser considerados como tóxicos y peligrosos. En dicha Directiva 91/689/CEE también se establecen los criterios para agrupar en categorías o tipos genéricos los residuos peligrosos clasificados según su naturaleza o actividad que los genera. A continuación, y según el anexo III de la Directiva 91/689/CEE, se describen las características de los residuos que permiten calificarlos de peligrosos:

- *H1. Explosivo:* se aplica a sustancias y preparados que pueden explosionar bajo el efecto de la llama o que son más sensibles a los choques o las fricciones que el dinitrobenceno.
- *H2. Comburente:* se aplica a sustancias y preparados que presenten reacciones altamente exotérmicas al entrar en contacto con otras sustancias, en particular sustancias inflamables.
- *H3-A. Fácilmente inflamable:* se aplica:
  - a sustancias y preparados líquidos que tengan un punto de inflamación inferior a 21 ℃ (incluidos los líquidos extremadamente inflamables),
  - a sustancias y preparados que puedan calentarse y finalmente inflamarse en contacto con el aire a temperatura ambiente sin aplicación de energía,
  - a sustancias y preparados sólidos que puedan inflamarse fácilmente tras un breve contacto con una fuente de ignición y que continúen ardiendo o consumiéndose después del alejamiento de la fuente de ignición,
  - a sustancias y preparados gaseosos que sean inflamables en el aire a presión atmosférica,
  - a sustancias y preparados que, en contacto con agua o aire húmedo, emitan gases fácilmente inflamables en cantidades peligrosas.
- *H3-B. Inflamable: s*e aplica a sustancias y preparados líquidos que tengan un punto de inflamación superior o igual a 21 ℃, e inferior o igual a 55 ℃.

- *H4. Irritante:* se aplica a sustancias y preparados no corrosivos que puedan causar reacción inflamatoria por contacto inmediato, prolongado o repetido con la piel o las mucosas.
- *H5. Nocivo:* se aplica a sustancias y preparados que por inhalación, ingestión o penetración cutánea puedan entrañar riesgos de gravedad limitada para la salud.
- *H6. Tóxico:* se aplica a sustancias y preparados (incluidos los preparados y sustancias muy tóxicos) que por inhalación, ingestión o penetración cutánea puedan entrañar riesgos graves, agudos o crónicos e incluso la muerte.
- *H7. Cancerígeno:* se aplica a sustancias o preparados que por inhalación, ingestión o penetración cutánea puedan producir cáncer o aumentar su frecuencia.
- *H8. Corrosivo:* se aplica a sustancias o preparados que pueden destruir tejidos vivos al entrar en contacto con ellos.
- *H9. Infeccioso:* se aplica a sustancias que contienen microorganismos vivos, o sus toxinas, de los que se sabe o existen razones fundadas para creer que causan enfermedades en el ser humano o en otros organismos vivos.
- *H10. Teratogénico:* se aplica a sustancias o preparados que por inhalación, ingestión o penetración cutánea puedan producir malformaciones congénitas no hereditarios o aumentar su frecuencia.
- *H11. Mutagénico:* se aplica a sustancias o preparados que por inhalación, ingestión o penetración cutánea puedan producir defectos genéticos hereditarios o aumentar su frecuencia.
- *H12.* Sustancias o preparados que emiten gases tóxicos o muy tóxicos al entrar en contacto con el aire, con el agua o con un ácido.
- *H13.* Sustancias o preparados susceptibles, después de su eliminación, de dar lugar a otra sustancia por un medio cualquiera, por ejemplo, un lixiviado que posee alguna de las características enumeradas anteriormente.
- *H14. Ecotóxico:* se aplica a sustancias y preparados que presentan o pueden presentar riesgos inmediatos o diferidos para el medio ambiente.

1.1. TOXICIDAD Y RECICLAJE

Este capítulo trata, precisamente, de la descripción de diversas tecnologías que a partir de una infinidad de residuos, con independencia de su grado de toxicidad antes expuesta, puedan transformarse o entrar a formar parte de materiales de los que sencillamente se denominan convencionales. En otras palabras: materiales reciclados.

La inertización es el conjunto de tratamientos a los que pueden someterse los residuos, antes de su deposición final, para evitar que interactúen desfavorablemente con el medio ambiente. Muchas veces es necesario o recomendable, someterlos a un tratamiento previo o pretratamiento para facilitar la labor o gestión posterior.

La Tabla 3.1 presenta una breve descripción de las más usuales de estas tecnologías, y que pueden resultar aplicables a la gestión de los residuos. La clasificación se lleva a cabo de acuerdo con la nomenclatura tradicional. La simple enumeración de las técnicas potencialmente útiles para el tratamiento de residuos, rebasaría con creces el ámbito de este libro y sería más propio de un tratado de ingeniería química. Por razones didácticas, la Tabla 3.1 expone las principales técnicas que se aplican al tratamiento, o pretratamiento, de residuos, siguiendo el esquema que se define en los manuales al uso en la ingeniería del medio ambiente, de acuerdo con los procesos básicos: físicos, químicos, etc.

Existe también una multiplicidad de tratamientos que surgen como combinación de algunos de los citados en la Tabla 3.1. Desde el punto de vista de la reutilización de residuos, o de su simple valorización, pueden servir la mayor parte de las tecnologías descritas en la Tabla 3.1. Sin embargo, para la fabricación de materiales de construcción a partir de residuos, tan sólo serían válidas algunas de estas técnicas, en particular aquéllas que presenten un marcado carácter de irreversibilidad de las reacciones físicas y/o químicas que han tenido lugar a partir de alguna de las tecnologías empleadas.

Tabla 3.1. Resumen de las técnicas de tratamiento y reciclaje de residuos.

Técnica	Denominación	Principio de funcionamiento
FÍSICAS	Decantación	Separación, por gravedad, de materias sedimentables.
	Floculación	Separación por gravedad. Unión de burbujas de aire con ciertas sustancias con cambio de densidad.
	Centrifugación	Separación por acción de la fuerza centrífuga.
	Filtración	Eliminación de sólidos suspendidos en líquidos.
	Destilación	Evaporación de algún componente de una mezcla líquida.
	Ósmosis inversa	Separación de sustancias a través de membranas semipermeables.
	Electrodiálisis	Separación de sustancias por cargas eléctricas a través de membranas semipermeables.
	Intercambio iónico	Absorción reversible de iones mediante un sólido insoluble.
	Adsorción	Fijación física de una sustancia de elevada superficie específica.
	Arrastre por vapor	Flujo de vapor o aire a contracorriente a través del fluido.
	Extracción con disolventes	Transferencia de un medio a un disolvente.
	Fotólisis	Descomposición mediante radiación luminosa.
QUÍMICAS	Neutralización	Transformación de una solución ácida o básica en neutra al añadir base o ácido, respectivamente.
	Precipitación química	Transformación de un contaminante en un sólido insoluble.
	Oxidación química	Transformación de contaminantes a formas más oxidadas y menos peligrosa.
	Reducción química	Transformación de contaminantes a formas menos oxidadas y menos peligrosas.
	Clorólisis	Valorización de residuos orgánicos con cloro gas a alta temperatura y presión.
	Decloración	Uso de reactivos para eliminar el cloro o cambiar su estructura .
	Oxidación por agua supercrítica	Destrucción de contaminantes con agua a presión y temperatura superiores a su punto crítico.
	Oxidación por aire húmedo	Inyección de aire con adición de O_2 a alta temperatura y presión.
	Rotura ácida	Adición de ácido para romper emulsiones.
BIOLÓGICAS	Fangos activados	Descomposición de sustancias orgánicas biodegradables: DBO.
	Tratamiento por bacterias	Separación de metales mediante bacterias.
	Compostaje	Mineralización de sustancias orgánicas.
	Metanización	Transformación de compuestos orgánicos en CH_4.
FISICOQUÍMICAS	Estabilización	Atenuación de la carga tóxica por reacción química.
	Solidificación	Mezcla con aditivos para dar consistencia.
	Encapsulación	Confinación de contaminantes en el interior de un medio protector.
	Ceramización	Inserción de contaminantes en una matriz silicatada.
	Vitrificación	Disolución e integración de contaminantes en una matriz vítrea.
ENERGÉTICAS	Pirólisis	Degradación térmica de residuos en ausencia de oxígeno.
	Gasificación	Transformación de residuos en gases combustibles.
	Incineración	Combustión de residuos con exceso de aire.
	Evaporación	Calentamiento para eliminar fases evaporables. En este tratamiento debe incluirse el secado.

2. Selección del proceso de tratamiento

Son muchos los parámetros que se deben tener en cuenta para la selección de los procesos de tratamiento óptimos de residuos, dado que los diversos profesionales que intervengan en la selección del proceso (fabricantes de equipos, técnicos, ingenieros, distribuidores, químicos e ingenieros químicos, autoridades reguladoras, ingenieros de planta, etc.) que poseerán diferentes perspectivas sobre el problema y su posible solución; por lo tanto, es posible que ninguna de las soluciones propuestas sea necesariamente, o estrictamente, correcta para solventar el problema planteado o deba recurrirse a la combinación de diversas tecnologías.

No obstante, sí que es factible apuntar que toda la selección de los procesos de tratamiento vendrá condicionada por cuatro factores: naturaleza del residuo, objetivo de los tratamientos, adecuación técnica de las diversas alternativas y consideraciones económicas.

2.1. NATURALEZA DEL RESIDUO

En este punto se debe considerar la forma física del residuo, así como el contenido de componentes peligrosos (metales pesados, compuestos orgánicos, etc.) y la concentración de contaminantes. Este conocimiento es muy importante, ya que indicará, por ejemplo, si el residuo es compatible con el equipo de los procesos considerados, los materiales constructivos, los sistemas de manipulación y vehiculación, la instrumentación y las medidas de seguridad necesarias.

Como ya se expondrá en el próximo capítulo, la gama de reciclaje de residuos sobre el que versa esta obra se basa, esencialmente, en los residuos procedentes de las actividades industriales, es decir, en los denominados residuos industriales, sin embargo también se destinan capítulos enteros al tratamiento y valorización de residuos de otra naturaleza como los comúnmente denominados domésticos.

Hace muchos años, cuando la mayor parte de la población era eminentemente rural, prácticamente la totalidad de los residuos eran de naturaleza orgánica. Este tipo de residuos apenas producían deterioro ambiental, puesto que sus componentes volvían a incorporarse al suelo en forma de nutrientes. En la actualidad, una parte considerable de los residuos generados es de naturaleza inorgánica, generalmente plásticos, vidrios y metales. Esto hace que cada vez se presenten más problemas de gestión y manipulación. No se pueden reintegrar al medio precisamente por su naturaleza inorgánica, y su deposición en condiciones no adecuadas puede ocasionar un deterioro ambiental de consecuencias incalculables.

A continuación, y a modo de ejemplo, se expone cómo gestionan en un centro universitario de una población española los diversos residuos que generan. Los responsables del centro han establecido un sistema de gestión de residuos con el objetivo de tratarlos convenientemente, además de concienciar a todos los estudiantes universitarios en su problemática si no se tratan adecuadamente. Los residuos generados en el centro son agrupados en tres categorías según su naturaleza: urbanos, peligrosos y radiactivos.

Los residuos urbanos pueden clasificarse en:

- Residuos orgánicos:
  - Restos de poda.
  - Restos de alimentos.
  - Animales muertos no inoculados con agentes químicos o infecciosos.
- Residuos inertes susceptibles de recuperación (procedentes de la recogida selectiva establecida en el «*campus*»):
  - Papel.
  - Cartón.
  - Vidrio.
  - Latas.
  - Plásticos.
  - Materiales de embalaje.
- Residuos inertes no susceptibles de recuperación, al menos de forma convencional:
  - Chatarras metálicas.
  - Muebles y objetos obsoletos.

Los residuos peligrosos son agrupados en el centro en dos grandes categorías:

- Residuos peligrosos provenientes de investigación y docencia:
  - Residuos químicos de laboratorio.
  - Residuos procedentes de actividades relacionadas con la fotografía.
  - Residuos biosanitarios.
  - Aceite mineral usado.

- Residuos peligrosos provenientes de mantenimiento y servicios:
  - Pilas.
  - Tubos fluorescentes y bombillas.
  - Cartuchos de tinta.
  - Material eléctrico y electrónico obsoleto.

En el centro universitario, los residuos radiactivos a considerar son los siguientes:

- Sólidos: fuentes inservibles, material diverso contaminado, etc.
- Líquidos: material líquido contaminado resultante de los ensayos de laboratorio, productos de descontaminaciones realizadas, etc.

Todo ello se expone a título de introducción, para poner de manifiesto que la educación ambiental y la recogida selectiva constituyen la primera asignatura para una correcta gestión del reciclaje.

2.2. OBJETIVO DEL TRATAMIENTO

Las corrientes o productos resultantes del proceso de pretratamiento pueden no ser aptos para las siguientes etapas a las que deberá someterse el residuo. Resulta imprescindible definir de antemano las características que deberá poseer el residuo una vez tratado en esta etapa inicial. Si el objetivo del tratamiento es, por ejemplo, la recuperación de algunos de los componentes del residuo, deberá seleccionarse aquel proceso que conduzca directamente a un producto reutilizable o que convierta al residuo en una forma a partir de la cual la recuperación deseada sea más sencilla.

La filosofía que caracteriza a este libro consiste en inertizar el residuo a la vez que se recicla. O dicho en otras palabras: someter el residuo a una de las técnicas antes enumeradas, o a una combinación de ellas, de manera que, a la vez que se transforma en un nuevo producto se elimina la toxicidad o bien los compuestos contaminantes son o destruidos (si son orgánicos) o confinados en una estructura desde la que no representan peligro alguno para las personas y el medio ambiente.

Podrían considerarse como objetivos del tratamiento a las siguientes acciones:

- Reducción de la cantidad de materiales usados, mediante la reutilización y el uso de los que generen menos residuos.
- Disminución de la cantidad de residuos generados mediante la separación en origen y la segregación de residuos.
- Reciclaje y reutilización de residuos.
- Reducción del volumen de residuos generados.
- Recuperación material y energética de los residuos.

2.3. ADECUACIÓN TÉCNICA DE LAS DIVERSAS ALTERNATIVAS

Lo más probable, para un residuo dado, es que se disponga de más de una alternativa para su tratamiento. En este punto no basta que un proceso funcione bien para un residuo determinado o parecido a otro, habrá que considerar, entre otros factores, la disparidad de concentraciones en las corrientes de la alimentación, la interferencia de otros componentes que no sean comunes, etc.

Por ejemplo, en el caso de los residuos hospitalarios, uno de los tratamientos habitualmente empleados es la incineración. En este caso se obtiene un producto (residuo secundario) que posteriormente debe depositarse en un vertedero. Por esta razón, algunos autores opinan que la incineración no puede considerarse como una tecnología de tratamiento final, como sí lo es el vertido controlado, sino simplemente como una tecnología de tratamiento. Por otra parte, las técnicas de esterilización dejan residuos menos peligrosos; sin embargo, los residuos punzantes y cortantes requieren de un control y de un manejo especial. El inconveniente de la incineración de residuos hospitalarios es que convierte un riesgo potencial, físico y biológico, en gases que será imprescindible depurar y cenizas que, si el proceso ha sido correcto son absolutamente inertes. La incineración destruye los patógenos (objetivo primordial del proceso) a la vez que otros materiales de naturaleza orgánica que, en teoría podrían ser objeto de reciclaje. Otras tecnologías, supuestamente alternativas, operan por esterilización, reduciendo el riesgo de infección o contaminación biológica con una mínima emisión de contaminantes:

- *Autoclave:* es la alternativa más popular. El autoclave destruye la mayoría de los organismos patógenos trabajando a elevadas temperaturas y presiones. Sin embargo, genera gases que también deben ser objeto de tratamiento. De hecho, esta aplicación es más lógica aplicarla para la esterilización.
- *Microondas:* destruye los organismos patógenos por efecto del calor originado por la energía cinética desarrollada por el cambiante campo eléctrico sobre las moléculas bipolares (de

ahí se deduce que el sistema es inútil para un patógeno completamente seco). A veces puede combinarse con un triturador, con lo que también se reduce el volumen de los residuos.

- *Desinfección química:* esta técnica elimina los patógenos mediante el uso de agentes químicos, como el hipoclorito sódico o el dióxido de cloro (algunos de estos desinfectantes van siendo progresivamente prohibidos).
- *Vertido controlado:* en este caso se obvia, casi cualquier tratamiento previo y se depositan los residuos en excavaciones profundas, lejos de aguas superficiales. Es muy importante evitar la deposición de sustancias como el mercurio, ya que puede causar contaminación edáfica. Esta alternativa es poco aconsejable.

En resumen, de los comentarios vertidos anteriormente se colige que el tratamiento correcto sería la incineración, naturalmente, con todos los pormenores y exigencias que obliga la ley.

2.4. CONSIDERACIONES ECONÓMICAS

En líneas generales se suele afirmar que el reciclaje es una operación económicamente cara. Es obvio que para poder efectuar una afirmación de esta índole hay que analizar un sinfín de parámetros. El más elemental es la abundancia: por ejemplo, en España el árido usado en construcción es barato puesto que las rocas son abundantes, mientras que en los Países Bajos apenas hay canteras. Así se comprende que en este último país se recicle gran cantidad de material de derribo para obtener un árido reciclado.

Sin embargo, en los últimos años y gracias a las directrices ambientales que emanan de los Programas de Acción de la UE en materia de Residuos, ha aparecido otro factor que poco tiene que ver con el anterior: la prelación de acciones en la gestión de residuos. Así, que hay que valorizar antes que depositar, lo que en términos económicos supone un automático encarecimiento de esta vía, el vertido controlado, frente a la valorización.

Desde el punto de vista industrial, este es el punto más importante a la hora de elegir un proceso de tratamiento o de cualquier otro tipo. Hay que evaluar, en estos casos, con precisión, los siguientes aspectos:

- Consumo energético del proceso.
- Coste de los reactivos.
- Coste del equipo y su mantenimiento.
- Coste de las medidas de seguridad.
- Coste de la mano de obra.

Las consideraciones económicas se refieren a las inversiones necesarias para la implantación de sistemas de tratamientos óptimos y adecuados, costes de operación y tarifas de gestión, teniendo en cuenta los beneficios generados. En relación a la implantación y desarrollo de un sistema de recogida selectiva de residuos, el Plan Nacional de Residuos Urbanos tiene previsto fomentar la viabilidad económica de los materiales recuperados mediante la implantación de medidas económicas, como tasas e incentivos, que penalicen el desaprovechamiento de residuos valorizables material y energéticamente. En el fondo la Directiva 1999/31/CEE, de 26 de abril, relativa al vertido de residuos relativa al vertido de residuos ha jugado un papel fundamental.

A todo ello habría que añadir los costes ambientales derivados, a medio o largo plazo, de una mala gestión ambiental.

3. Tecnologías aplicables al reciclaje multidisciplinar

La técnica de reutilización de residuos ha sido históricamente practicada y aceptada, si bien es cierto que a pequeña escala y circunscrita únicamente a la recuperación de metales, papel, vidrio, fibras textiles y algunos materiales de construcción. El término reciclaje multidisciplinar está referido en este caso a la reutilización de los residuos para su transformación en materiales aptos para la construcción, usando una o diversas combinaciones de las tecnologías que se explican en este capítulo.

No en vano la construcción es una excelente industria para la absorción de cuantiosas cantidades de residuos, bien directamente o después de ser sometidos a un cierto proceso de adecuación. Una de las ventajas de la construcción es que, al margen de poder digerir grandes cantidades de materiales, admite una gama inmensa de calidades, lo que permite confeccionar un amplio abanico de materiales cada uno con una calidad estandarizada y adecuada para un uso concreto.

Existe una gama importante de tecnologías probadas para el reciclaje de residuos; sin embargo, en el presente capítulo se exponen las que, a juicio de los autores, se juzgan más adecuadas para la valoriza-

ción de residuos: absorción, adsorción, intercambio iónico, ceramización, vitrificación, estabilización y solidificación, sistemas mixtos, compostaje, etc.

Pese a que la mayor parte de las técnicas indicadas son, en realidad, combinación de una o más operaciones básicas de la química y/o la física, en la descripción de las tecnologías aplicables al reciclaje multidisciplinar se intentará ceñirse a la clasificación general expuesta al comienzo del presente capítulo, obedeciendo a la fase que presente un mayor peso específico.

4. Técnicas físicas

Los tratamientos físicos se emplean, principalmente, en el denominado pretratamiento de los residuos. No obstante, algunas veces estas técnicas se pueden usar como complemento a los métodos químicos y biológicos. Por ejemplo, la fotólisis o fotodegradación se ha utilizado con éxito para tratar DDT (dicloro-difenil-tricloroetano), PCB (policlorobifenilo) y TCDD (clorodibenzo-p-dioxinas). Las microondas pueden ser útiles para tratar productos orgánicos con puntos de ebullición por debajo de su temperatura de descomposición.

En este aparatado se citan las mas conocidas, o en honor a la verdad, aquellas tecnologías que van a ser aptas para el tratamiento y valorización de residuos de cara a su valorización. Existen, no obstante infinidad de ellas como puede ser el caso de la fotodegradación de hidrocarburos aromáticos en aguas que en definitiva son tecnologías que se basan en la destrucción fotocatalítica de los compuestos orgánicos (también en la eliminación de los contaminantes metálicos). El objetivo de la fotodegradación consiste en transformar cuantitativamente la materia orgánica en CO_2, logrando así la mineralización completa de los contaminantes orgánicos. La gran ventaja es que emplea la energía solar como fuente de alimentación, sin embargo, la cinética del proceso es lenta. La técnica aplicada industrialmente se basa en la utilización de la fracción del ultravioleta cercano (UV-A) de la radiación solar mediante la acción de un catalizador que genera radicales hidroxilo (OH^-) que posen una potente acción oxidante. En ciertas condiciones de presión y temperatura estos radicales mineralizan la materia orgánica a CO_2 y agua.

Otra tecnología prometedora es la esterilización, y su aplicación al tratamiento mediante CO_2 supercrítico. De la que se habla extensamente en el Capítulo 6 de esta obra.

4.1. ABSORCIÓN

La absorción es una operación básica en la que se separa uno o más componentes de una mezcla gaseosa por medio de un líquido en el que son solubles. La absorción es, esencialmente, un fenómeno físico aunque, con frecuencia, se ven involucradas muchas reacciones químicas. Por tanto, presenta muchos casos intermedios.

La principal finalidad que debe perseguir un sistema de absorción eficaz es conseguir un contacto lo más íntimo posible entre el gas y el líquido. Por ejemplo, se quiere disminuir el contenido de un componente tóxico no deseado en una corriente gaseosa mediante su absorción en una corriente líquida en una torre de absorción a contracorriente. Para aumentar la eficacia se puede añadir alguna sustancia que reaccione con el componente tóxico absorbido. En este sentido, la eficacia aumentará si la reacción es muy rápida y el componente tóxico poco soluble.

La Figura 3.1 muestra un equipo de absorción (un lavador de gases) en el que el producto contaminado (por ejemplo, una mezcla de acetona y aire) se hace interaccionar con el disolvente (por ejemplo, agua). Una vez puestas en contacto las dos corrientes, el elemento contaminante (acetona) es transferido al líquido (agua) para su posterior tratamiento.

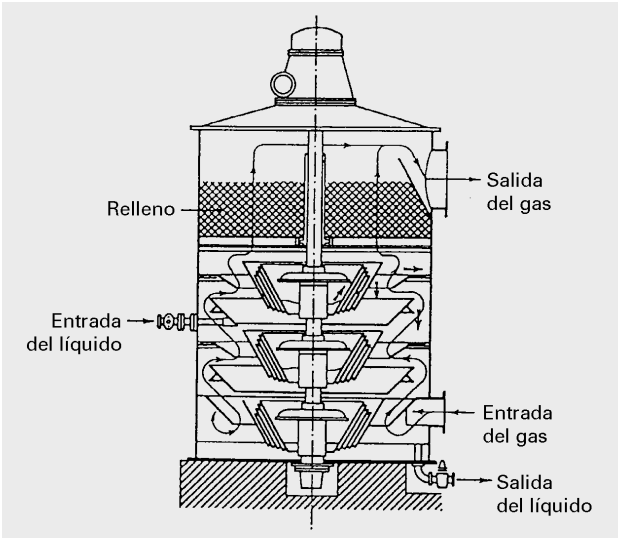


Figura 3.1. Equipo de absorción.

Se trata de un proceso de descontaminación de corrientes gaseosas, donde el elemento contaminante es transferido al líquido, lo que supone una importante reducción de la masa contaminada a tratar, debido a que es más fácil de transportar y tratar.

El proceso inverso, es decir, separar de una mezcla líquida uno de sus componentes por medio de un gas, recibe el nombre de desorción (o *stripping*, en terminología anglosajona). Por ejemplo, en la industria química y farmacéutica, la presencia de oxígeno u otros gases disueltos puede ocasionar un efecto nocivo en los líquidos que los contienen. Un método para eliminar estas sustancias interferentes es el arrastre con nitrógeno, también denominado *stripping*. Esta técnica consiste en hacer pasar pequeñas burbujas de nitrógeno gas a través del líquido a purificar. El nitrógeno arrastra los gases disueltos contaminantes y los difunde en su fase gaseosa, eliminándolos en la corriente de salida. El rendimiento de esta operación depende del tamaño de las burbujas de nitrógeno (se incrementa al aumentar la superficie de intercambio), de la distribución uniforme de las burbujas a través del líquido y del tiempo de contacto entre las burbujas y los contaminantes.

Esta operación puede hacerse en procesos en continuo o en *batch*, dependiendo del caudal de trabajo, tipo de fluido, contaminación inicial, etc. El proceso de *stripping* requiere bajos costes de inversión y prácticamente nulos costes de mantenimiento, contribuyendo a conseguir notables ahorros y beneficios en los procesos donde se utiliza.

Otra tecnología desarrollada es la desorción térmica, muy utilizada para la restauración y bioremediación de suelos contaminados por actividades petrolíferas de extracción. La USEPA define el proceso de desorción térmica como una técnica para tratar la tierra contaminada mediante el calentamiento entre 90 y 540 ℃, de forma que los contaminantes de bajo punto de ebullición vaporicen convirtiéndose en gases, pudiendo separarse de la tierra para ser tratados posteriormente de forma adecuada. La desorción térmica, a diferencia de la incineración, utiliza el calor de forma indirecta para separar físicamente los contaminantes edáficos, mientras que la incineración emplea el calor de forma directa para destruir los contaminantes. La Figura 3.2 muestra esquemáticamente el proceso de desorción térmica.

De cara a la revegetación, el principal inconveniente de esta técnica, a corto plazo, es que el suelo queda completamente transformado, sin materia orgánica ni microorganismos. Igualmente, el suelo no puede disponer de vegetación debido a los bajos niveles de nitrógeno y fósforo.

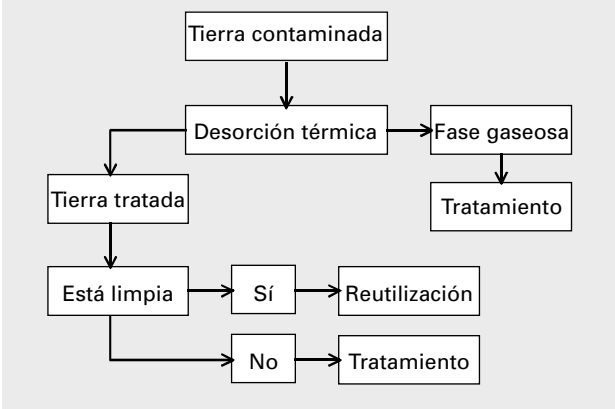


Figura 3.2. Diagrama esquemático de un proceso de desorción térmica.

En el punto 1 del DVD adjunto se muestra información adicional sobre procesos industriales de absorción de contaminantes presentes en gases.

4.2. ADSORCIÓN

La adsorción es aquella propiedad que poseen algunas sustancias para fijar en su superficie ciertas moléculas. Los adsorbentes industriales más utilizados son el carbón activo y las resinas sintéticas. Además de su aplicación en el tratamiento de aguas potables y residuales, la adsorción se utiliza para la recuperación de ciertos productos orgánicos (fenoles, pesticidas, etc.) y algunos metales.

La adsorción es un fenómeno que tiene lugar en la superficie de un cuerpo, llamado adsorbente, consistente en la separación de dos fases: una sólida y una fluida. Es un proceso muy empleado en depuración de gases donde el elemento contaminante que se halla suspendido en el gas a depurar es retenido por el elemento adsorbente.

Las principales características de los procesos de adsorción son las siguientes:

- *Selectividad.* La cantidad adsorbida depende de la naturaleza y del tratamiento previo al que se haya sometido a la superficie del adsorbente, así como de la naturaleza de la sustancia adsorbida (adsorbato). Al aumentar la superficie de adsorbente y la concentración de adsorbato, aumenta la cantidad adsorbida.

Tabla 3.2. Efectividad de los gases en los procesos de adsorción de contaminantes

Contaminante	Gas	Intervalo de concentración	Tiempo de contacto necesario
H_2S, COV, CS_2, mercaptanos	Gas de síntesis, CO_2, H_2, CH_4, N_2	0-1.000 ppm	1-4 s
SO_2, HCl, NO_2, HF	La mayoría de gases	0-1.000 ppm	1-4 s
Aceites, lubricantes	Aire comprimido, N_2	0-50 ppm	5-20 s
Productos orgánicos	La mayoría de gases	0-2.000 ppm	1-4 s
Vapor de mercurio	Gas natural, H_2	0-100 ppm	1-10 s
Arsina, fosfamina	La mayoría de gases	0-1.000 ppm	1-4 s
Dioxinas, mercurio	Gases de combustión	0-1.000 mg TEQ/Nm^3	—

- *Rapidez*. La velocidad del proceso se incrementa al aumentar la temperatura, y disminuye al aumentar la cantidad adsorbida.
- *Proceso espontáneo*. El cambio de entalpía cuando 1 mol de adsorbato es adsorbido por el adsorbente se conoce como entalpía de adsorción.
- *Proceso exotérmico*, por lo que al aumentar la temperatura disminuye la cantidad adsorbida.

El fenómeno de adsorción tiene lugar gracias a fuerzas débiles del tipo *Van der Waals*, de ahí la importancia que representa la superficie específica. El carbón activado es un material microporoso fabricado a partir de materia prima carbonácea, como la turba, madera o lignito. El proceso de activación desarrolla miríadas de poros de dimensiones casi atómicas en el seno del material, lo que constituye una enorme superficie específica, del orden de 2.000 m^2 por gramo de carbón activado.

Las fuerzas de *Van der Waals* forman un enlace no covalente mediante la combinación de fuerzas de atracción y de repulsión. Los átomos forman pequeños dipolos, de forma que la presencia de este dipolo transitorio hace que los átomos contiguos también se polaricen, produciendo pequeñas fuerzas de atracción.

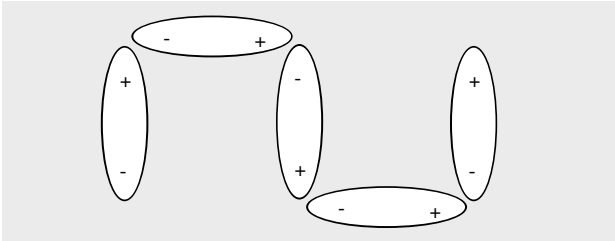


Figura 3.3. Disposición bipolar de átomos contiguos, formando fuerzas de atracción electrostática entre dipolos.

A estas fuerzas de atracción entre átomos se opone la repulsión electrostática entre capas electrónicas de dos átomos contiguos. La resultante de estas dos fuerzas opuestas es una distancia mínima entre los núcleos de dos átomos próximos, conocida como radio de *Van der Waals*.

La Figura 3.4 ilustra el concepto de cómo las láminas moleculares se mantienen unidas mediante enlaces químicos. Cuando las impurezas son adsorbidas quedan atrapadas en la superficie de esta estructura formando fuertes uniones físicas con el carbón.

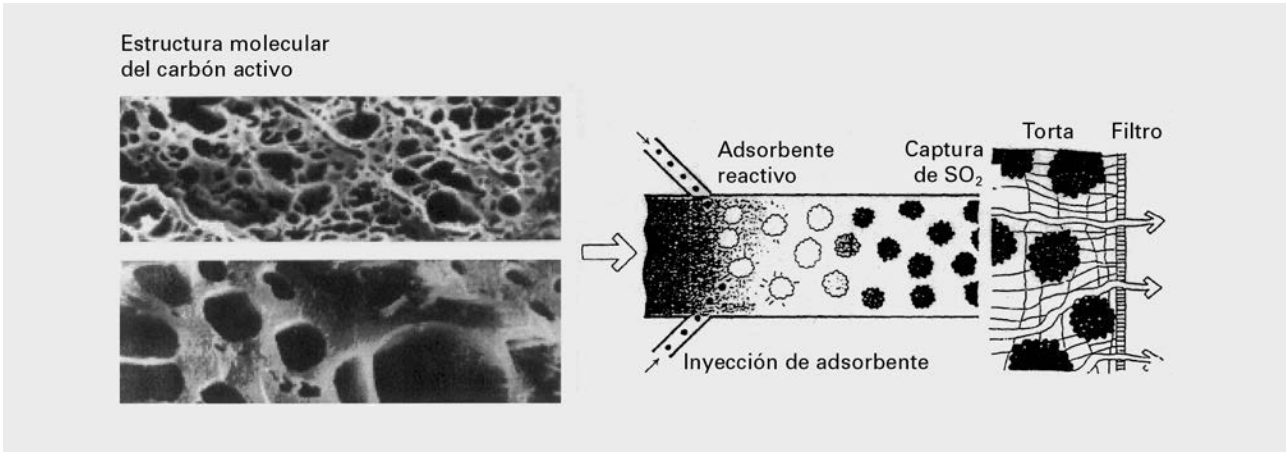


Figura 3.4. El mecanismo de adsorción.

Tabla 3.3. Relación de diversos compuestos químicos según su capacidad de ser retenidos por carbón activo

Compuestos químicos muy fácilmente retenidos por carbón activo		
aldrin	DDT	isooctano
antraceno	1,2-diclorobenceno	naftaleno
bifenil	1,3-diclorobenceno	nitrobenceno
bromodiclorometano	1,4-diclorobenceno	ozono
p-bromofenol	dietilftalato	pentaclorofenol
butilbenceno	dióxido de cloro	tetracloroetileno
ciclohexano	etilbenceno	m-xileno
clorobenceno	hexano	o-xileno
clorotolueno	hipoclorito cálcico	p-xileno
Compuestos químicos fácilmente retenidos por carbón activo		
anilina	1,2-dicloropropano	hidroquinona
benceno	estireno	tetracloruro de carbono
bromoformo	etileno	tolueno
1,1-dicloroetileno	fenol	tricloroetileno
Compuestos químicos difícilmente retenidos por carbón activo		
acetona	cloruro de metilo	propileno
acetonitrilo	dimetilformaldehido	propionitrilo
alcohol isopropílico	1-propanol	tetrahidrofurano

Los átomos de carbono existentes en la superficie interna del carbón activado ejercen una atracción (fuerzas de *Van der Waals*) sobre las moléculas de los líquidos y gases circundantes. Esta es la base del mecanismo que permite al carbón activado separar uno o más componentes de una mezcla. La Tabla 3.2 expone la cinética para la purificación de una serie de gases de proceso.

Hay que distinguir entre diferentes tipos de adsorciones:

- *Adsorción física.* Actúan las fuerzas de *Van der Waals*, y se consideran muy rápidas.
- *Adsorción química.* En los procesos de quimisorción las uniones superficiales sólo pueden explicarse por fuerzas químicas. Estas adsorciones suelen ser más lentas.
- *Adsorción coloidal.* Se presenta en cuerpos dispersos coloidales, y se deben a su gran desarrollo superficial. Tiene especial relevancia en procesos de tintorería, ya que muchos colorantes son de naturaleza coloidal.

Los sistemas habituales para efectuar la adsorción son por contacto, agregando el adsorbente a la disolución, agitando y separando luego el adsorbente del líquido mediante decantación. El medio adsorbente suele ser polvoriento, actuando por percolación, método que consiste en hacer pasar el adsorbato, líquido o gas, por un lecho de adsorbente en forma granular.

En el caso del carbón activo, una de las ventajas es la facilidad de regeneración del carbón. El carbón activado utilizado en los procesos de adsorción alcanza un nivel de saturación, a partir del cual no adsorbe más producto. En este punto el carbón activado debe ser regenerado o desechado, lo que equivale a un elevado coste de operación. La forma más habitual es la regeneración térmica. En ella el material se calienta hasta una temperatura en la que los elementos contaminantes, generalmente orgánicos, destilan y dejan limpios los poros.

La regeneración química del carbón activo se puede realizar con ácidos, gases y disolventes. Este caso es el más usado para tratar aquellos carbones que se hallan contaminados con materiales inorgánicos. Otro método es la regeneración con vapor, aunque es empleado únicamente en carbones activados que han retenido productos muy volátiles.

En la Tabla 3.3 se relacionan algunos productos químicos según su facilidad para ser retenidos por carbón activo.

Son diversos los parámetros que influyen en los procesos de adsorción. En este sentido, la adsorción se incrementa si también aumenta:

- El peso molecular.

- El punto de ebullición.
- El índice de refracción.
- La concentración.

De la misma forma, la capacidad de adsorción aumenta si disminuye:

- La presión de vapor.
- La temperatura.
- La humedad.

El punto 2 del DVD adjunto se muestran ejemplos industriales del uso de diversos carbonos activos en procesos de adsorción.

4.3. INTERCAMBIO IÓNICO

Consiste en una reacción reversible en la que los cationes metálicos de una disolución se intercambian por ciertos iones del mismo signo que contiene el intercambiador. Cuando éste se satura debe ser regenerado. Casi todos los iones metálicos pueden ser eliminados o recuperados por este procedimiento.

Los intercambiadores iónicos pueden considerarse como matrices sólidas que contienen grupos ionogénicos con carga (positiva o negativa) neutralizada por un contraión de carga opuesta. Es en estos sitios activos donde tiene lugar la reacción de intercambio iónico. Por ejemplo, la siguiente reacción muestra el intercambio de un ión calcio presente en una disolución por iones sodio de la matriz sólida:

$$2\ R\text{-}Na + Ca^{2+}_{(aq)} \leftrightarrow R_2\text{-}Ca + 2Na^{+}_{(aq)}$$

Esquemáticamente, la reacción sería la simbolizada en la Figura 3.5.

A medida que la disolución que contiene los iones Ca^{2+} pasa a través de la resina se van intercambiando los iones, es decir, se desplazan los iones Na^{+} de sus sitios activos pasando a la disolución. La eficacia de este proceso depende de diversos factores:

- La afinidad de la resina con los iones de la disolución.
- El pH del medio.
- La temperatura.
- La concentración de la disolución.

Esencialmente, el proceso de intercambio de iones consiste en sustituir en una disolución uno o varios de sus iones (los que resulta dañinos para el medioambiente) por otros que sean inocuos. No se trata de un simple paso de iones, unos en un sentido y otros en el contrario, a través de una superficie del sólido intercambiador, sino que el proceso se inicia por una adsorción a la que sigue una reacción química.

Existen numerosas arcillas con capacidad de intercambio iónico, como las montmorillonitas, las zeolitas y las vermiculitas, perteneciendo todas ellas a los silicatos estratificados; sin embargo, el uso más generalizado se halla en las resinas orgánicas de intercambio iónico: poliestireno, poliacrilamida, poliacrílicas, etc. La mayor aplicación de estas resinas para la retención de metales conflictivos tiene lugar en el sector galvánico y de tratamiento de superficies. Una de las ventajas del uso de la técnica de intercambio iónico es que permite obtener una disolución más concentrada de los cationes metálicos, lo que facilita su posible recuperación o tratamiento.

4.3.1. Resinas de intercambio iónico

El intercambio iónico es un método fisicoquímico, basado en la operación de adsorción, para concentrar y recuperar productos inorgánicos disueltos en disoluciones acuosas con bajas concentraciones de carga contaminante.

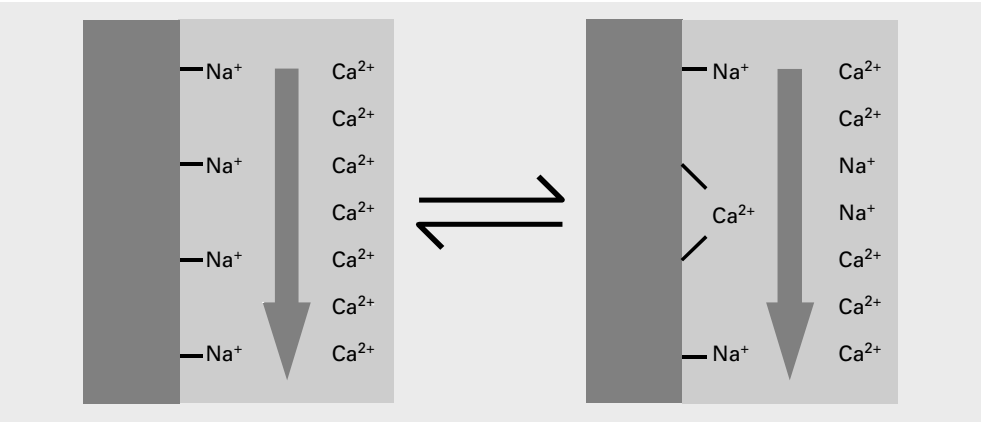


Figura 3.5. Representación esquemática del proceso de intercambio de iones Ca^{2+} de una disolución por iones Na+ de una resina.

El método, tal y como se ilustra en la Figura 3.6, se basa en hacer pasar el residuo a través de un lecho, o resina, formada por iones. Si el potencial electroquímico del ión a recuperar, o ión contaminante, es mayor que el del ión de la resina, éste pasa a la disolución y el ión contaminante queda fijado en la resina. Las resinas se pueden clasificar en aniónicas y catiónicas. Es importante destacar que la mayor parte de los adsorbentes son resinas: compuestos orgánicos de gran peso molecular con la propiedad de disponer de un residuo catiónico o aniónico intercambiable; gracias a su alta porosidad la adsorción puede tener lugar fundamentalmente en el interior de las partículas, aumentado así el área de contacto.

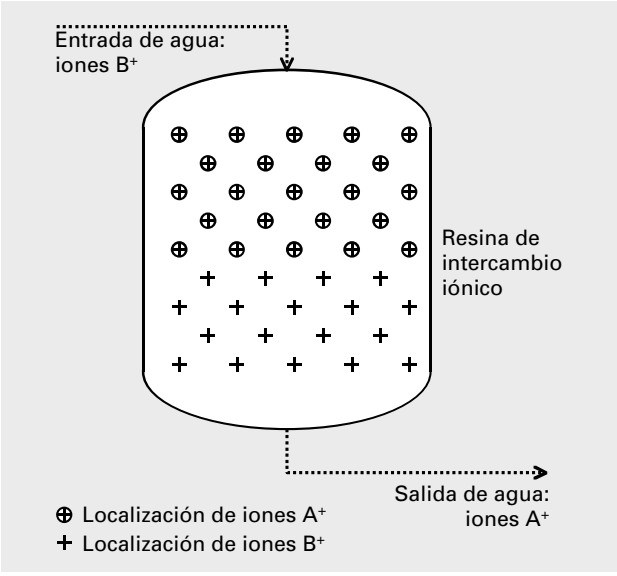


Figura 3.6. Representación esquemática del proceso de intercambio iónico.

Una de las aplicaciones más habituales de las resinas de intercambio iónico es la eliminación de los iones contenidos en los residuos líquidos acuosos, con el fin de poder reutilizar posteriormente estas aguas en el proceso. También puede tratarse de una técnica de valorización de metales a partir de las aguas de regeneración de la resina.

Es un método ampliamente difundido y se diseñan resinas selectivas en función del residuo a tratar. Entre éstos se incluyen radionúcleos, aguas procedentes de los tratamientos de superficie, tratamientos de agua, etc.

Es un sistema muy eficaz para recuperar la mayoría de los cationes de los metales pesados: Ba, Cd, Cu, Pb, Hg, Ni, Se, Ag, U y Zn. La tecnología también es aplicable a los aniones. La principal desventaja es el hecho que las resinas usadas no son selectivas y el material recuperado es una mezcla de cationes que más tarde deberán separarse para su reutilización.

4.4. SEPARACIÓN DE LÍQUIDOS INMISCIBLES

Dos o más líquidos inmiscibles pueden separarse aprovechando sus diferentes densidades: el más denso se desplazará hacia la parte inferior, mientras que el más ligero quedará localizado en la parte superior. La separación de diversos líquidos, supone la aplicación de tecnologías difíciles y costosas.

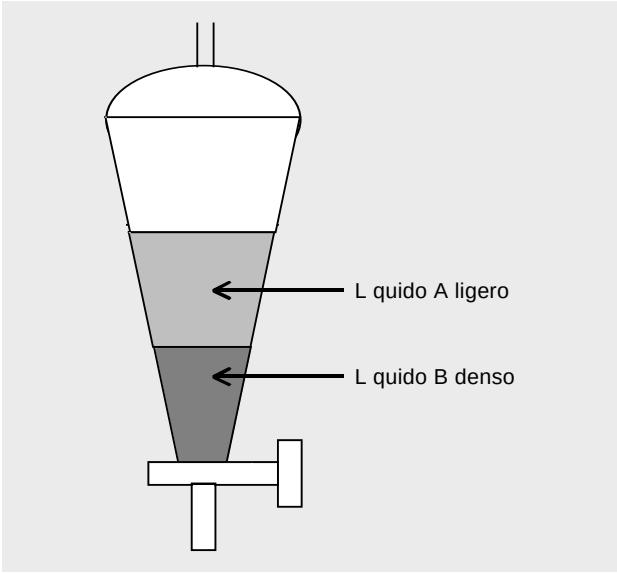


Figura 3.7. Proceso de separación de líquidos inmiscibles, en función de su diferente densidad.

Los hidrociclones son máquinas simples que permiten, a un coste muy razonable, la separación de sustancias inmiscibles, líquidos insolubles y/o mezclas de líquidos. Para ello se requiere una cierta presión de trabajo, del orden de 2 bar.

Como indica la Figura 3.8 el efluente entra en el hidrociclón impulsado por una bomba. Como el flujo esta forzado a circular hacia abajo forma un helicoide en la zona próxima a las paredes y un vértice en la parte central. La velocidad se acelera debido al estrangulamiento de la sección; ello genera una potente fuerza centrífuga que permite la separación de las diversas fases. El líquido más denso fluye hacia la parte inferior, mientras que la fracción más ligera se dirige hacia la parte superior. Este equipo también se aplica para la separación entre sólido/líquido, sólido/gas y líquido/gas.

Para ser separados ciertos líquidos, por ejemplo agua y aceite, deben ser inmiscibles y tener una di-

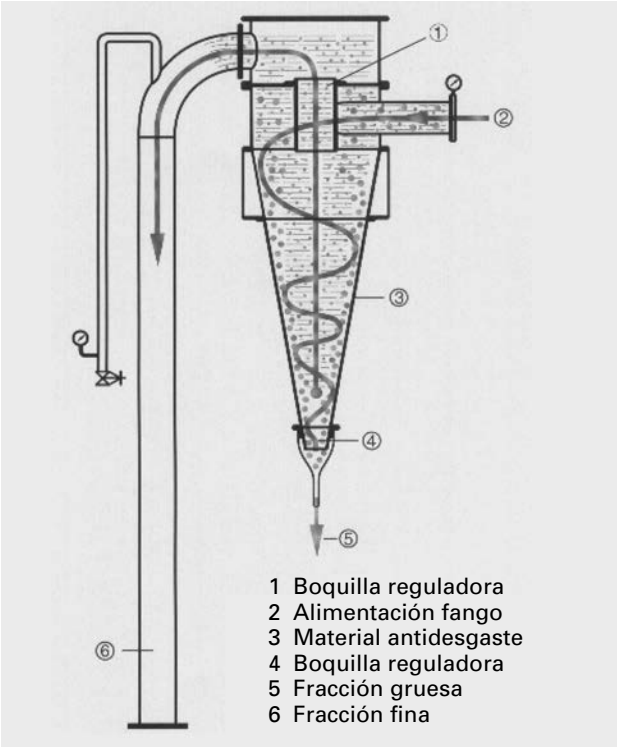


Figura 3.8. Principio de funcionamiento de un hidrociclón.

ferencia de densidad superior a 0,05 g/cm^3. También es preciso que el líquido tenga una viscosidad baja. En caso de contener un gas o vapor, el volumen de éste no debe sobrepasar el 20% del total.

La Figura 3.9 muestra el esquema de un equipo completo en funcionamiento.

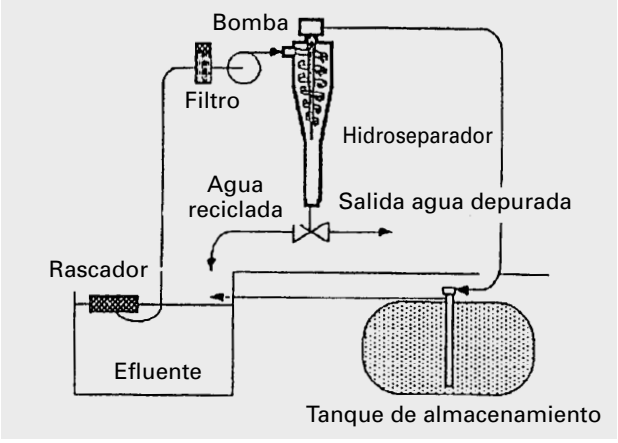


Figura 3.9. Principio de funcionamiento de un hidroseparador.

El punto 3 del DVD adjunto aporta información complementaria sobre sistemas de separación de líquidos.

4.5. DESTILACIÓN

La destilación es una operación química que consiste en calentar una mezcla líquida hasta que sus componentes más volátiles pasan a la fase vapor; a continuación se puede enfriar el vapor para recuperar dichos componentes en forma líquida mediante una etapa de condensación. A diferencia de la separación de líquidos inmiscibles, que se basaba en la diferente densidad de sus componentes, la destilación pretende separar una mezcla aprovechando sus distintas volatilidades, es decir, sus diferentes puntos de ebullición, con lo que es posible separar los componentes volátiles de los no volátiles.

Por ejemplo, en los procesos de evaporación y secado se quiere obtener el componente menos volátil, mientras que el más volátil, generalmente agua, se elimina; este sería el caso de la eliminación del agua de la glicerina mediante la evaporación del agua. En la destilación el objetivo es obtener el componente más volátil en forma pura, como sucede en la eliminación del agua del alcohol a través de la evaporación del alcohol.

Si la diferencia entre los puntos de ebullición de dos componentes es significativa, puede realizarse fácilmente la separación completa en una destilación individual. Por ejemplo, el agua del mar contiene prácticamente un 4% de sal común, y puede purificarse fácilmente mediante la evaporación del agua y la condensación posterior del vapor para recoger el producto: agua destilada. Este producto puede considerarse equivalente al agua pura, aunque en realidad contiene algunas impurezas en forma de gases disueltos, como el dióxido de carbono. En cambio, si los puntos de ebullición de los componentes de una mezcla son parecidos, no se puede conseguir la separación total mediante una destilación individual. Un ejemplo importante es la separación de agua, con punto de ebullición de 100 ℃, y alcohol (78,5 ℃). Si se hierve una mezcla de estos dos líquidos, el vapor que sale es más rico en alcohol y más pobre en agua que el líquido del que procede, pero no es alcohol puro. Por esta razón el producto destilado debe someterse a sucesivas destilaciones.

En el caso de disponer de mezclas de productos solubles, uno de cuales es un compuesto orgánico tóxico, como los compuestos orgánicos volátiles, puede aplicarse la destilación para separar y concentrar el COV del otro compuesto de menor volatilidad. Generalmente, y tal y como se ha explicado con anterioridad, el proceso supone una serie de etapas de

evaporación y condensación para recuperar los diversos componentes de la mezcla líquida.

Un ejemplo clásico es la recuperación de disolventes a partir de residuos de pinturas o de soluciones de limpieza de metales. Los residuos con altos contenidos en sólidos o con materiales que polimericen pueden ocasionar problemas de proceso. Una variante del proceso, esquematizado en la Figura 3.10, consiste en la destilación al vacío que supone una notable mejora de la eficacia del proceso. La destilación al vacío consiste en la separación de sustancias de una mezcla líquida a temperaturas inferiores a su punto normal de ebullición mediante la disminución de la presión, de modo que al aumentar el grado de vacío disminuye la temperatura de destilación. Un caso particular de este método es la destilación molecular, en la que la presión es totalmente nula; este proceso suele ser habitual en la purificación de productos altamente inestables.

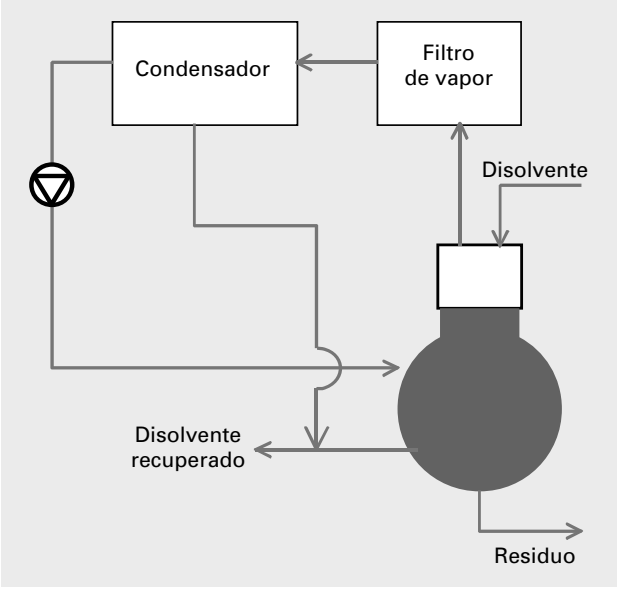


Figura 3.10. Esquema del proceso de destilación al vacío.

Otra variante, muy usada en Cataluña para el tratamiento de regeneración de aceites usados de automoción, es el proceso de destilación fraccionada. La destilación fraccionada es una técnica empleada para realizar un conjunto de pequeñas destilaciones simples. Proporciona una gran superficie para el intercambio calorífico entre las fases vapor y líquido a lo largo de diversas evaporaciones y condensaciones parciales en toda la columna de fraccionamiento.

El funcionamiento es el siguiente: cuando en un punto de la columna el condensado toma calor del vapor, una parte de éste se evapora de nuevo formando un vapor más rico en el componente más volátil, es decir, en el de menor punto de ebullición; igualmente, cuando el vapor cede calor al condensado, una parte del mismo se condensa, siendo más rico en el componente menos volátil, es decir, el de mayor punto de ebullición. Se puede afirmar que a medida que aumenta la altura de la columna de destilación, aumenta el enriquecimiento del componente más volátil, estableciéndose un gradiente térmico entre ambos puntos de ebullición.

Una de las limitaciones serias de este tipo de procesos estriba en que los residuos sometidos a destilación deben tener una baja concentración de sólidos para prevenir fallos en el equipo. Los residuos susceptibles de producir alquitranes al ser calentados van a generar una serie de complicaciones en el resto de la instalación que, por lo general, son rechazados.

4.6. EVAPORACIÓN

Una técnica cercana a la destilación es la evaporación. Consiste en la vaporización del líquido contenido en una solución (lodo, fango, lechada, etc.) para la concentración del material sólido, a base de aplicar una potente fuente generadora de calor. El proceso es válido cuando uno de los componentes es mínimamente volátil. En muchos casos, el líquido que se evapora es agua, y se utiliza esta tecnología para concentrar los componentes no volátiles. En otras ocasiones la evaporación se utiliza para separar disolventes de sólidos no volátiles, aceites o agua como primer paso en la recuperación de disolventes usados.

Puesto que la evaporación es una operación cara pero útil para muchas aplicaciones, se suele recurrir a técnicas complementarias para reducir los costes de explotación. La más conocida es la cogeneración: en ella los gases calientes de escape de motores y/o turbinas son una forma abundante y barata de calor para producir la evaporación. No obstante, en ocasiones, el impacto ambiental generado puede ser importante ya que junto al agua se evaporan una serie de compuestos semivolátiles indeseables.

Una de las aplicaciones de la evaporación al vacío es el tratamiento de los residuos líquidos generados en el lavado de vehículos. Estas aguas residuales generadas se caracterizan por un pH alcalino y una elevada concentración de sólidos en suspensión, además de contener aceites y sustancias grasas, sulfatos y metales pesados. La demanda química de oxígeno (DQO)

es de unas 10.500 ppm, mientras que la conductividad del agua es superior a 15.900 µS/cm. El proceso de evaporación al vacío es efectivo para el tratamiento de este tipo de aguas, presentando un rendimiento superior al 90%, pudiendo además reciclar posteriormente el producto destilado. La Tabla 3.4 muestra los parámetros químicos del agua residual y del producto después de someterlo a tratamiento.

Tabla 3.4. Comparación del análisis químico de las aguas residuales provinentes del lavado de vehículos y del producto destilado. (*Fuente:* LED Italia, SrL).

Parámetros	Antes del tratamiento	Después del tratamiento
pH	10,3	8,5
Densidad (g/ml)	1,015	1,0
Sólidos sedimentables (ml/l)	3	<1
Conductividad (µS/cm)	15.940	10,6
DQO (mg/l)	10.500	184
Cloruros (mg/l)	319	<10
Sulfatos (mg/l)	368	<10
Fósforo total (mg/l)	2,9	<0,1
Amonio (mg/l)	<5	<5
Hierro (mg/l)	31,6	<0,1
Cobre (mg/l)	17,4	<0,05
Plomo (mg/l)	150	<0,1
Aceites (mg/l)	980	<1
Tensioactivos (mg/l)	202	1,11

El punto 4 del DVD adjunto muestra equipos industriales de evaporación.

4.6.1. Evaporación al vacío

Se distinguen varios principios o modalidades diferentes de evaporar y cada una de ellas presenta unas ventajas económicas y/o técnicas en función de la caracterización del residuo. Las más representativas son:

- Evaporación al vacío.
- Evaporación con bomba de calor.
- Evaporación por termocompresión de vapor.
- Evaporación multiflash o multiefecto.

La evaporación al vacío consiste en reducir la presión del interior de la caldera por debajo de la presión atmosférica. Esto permite reducir la temperatura de ebullición del liquido a evaporar lo que reduce la cantidad de calor a aportar/eliminar en el proceso de ebullición y de condensación, además de otras ventajas técnicas como la de poder destilar líquidos con alto punto de ebullición, evitar la descomposición de sustancias sensibles a la temperatura, etc.

Por este sistema se tratan las aguas residuales procedentes de la industria farmacéutica o las aguas resultantes del lavado de vehículos.

El punto 5 del DVD adjunto muestra ejemplos de evaporadores industriales al vacío.

La evaporación con bomba de calor disfruta del ciclo frigorífico de un gas freón, mediante la acción de la compresión del gas que se condensa y cede calor al líquido a evaporar mediante intercambio térmico, posteriormente se procede la expansión del gas por medio de una válvula termostática y la acción de un condensador que refrigera el liquido evaporado y extrae el destilado. El freón discurre en circuito cerrado y hermético. Al estar sometido el reactor de evaporación al vacío, permite evaporar a temperaturas sobre los 40 ℃ por lo que no se precisa de ninguna otra fuente de calor ni refrigeración convirtiéndose en un proceso muy atractivo desde el punto de vista económico y de gestión. La energía absorbida en este procedimiento varía según la aplicación y el fluido a tratar: sin embargo consumos entre 150 y 200 W por litro de destilado son habituales. De ahí a que el sistema se ajuste bien a la bomba de calor.

Este sistema de baja temperatura de evaporación permite una gran diversidad de aplicaciones, incluso para líquidos muy corrosivos mediante aleaciones especiales y recubrimientos de teflón, sistemas de evaporación hasta residuo seco, líquidos fuertemente incrustantes o que cristalizan, etc.

La evaporación por termocompresión trata de recuperar el calor latente de condensación del destilado como fuente de calentamiento del líquido a evaporar. A este fin, la temperatura del vapor generado durante la evaporación, se incrementa mediante compresión del propio vapor. De esta manera el vapor sobrecalentado puede ser reciclado por medio de un intercambiador del propio evaporador consiguiéndose un doble objetivo: ahorro de energía para la evaporación y evitar el medio refrigerante para la condensación (torre de refrigeración, etc.)

Sin duda, la evaporación con termocompresión, se trata del sistema de evaporación mediante corriente eléctrica de mayor eficacia energética, ya que absorbe entre 60 y 80 W por litro de destilado. Aunque su aplicación se ve limitada a la hora de tratar fluidos corrosivos, básicamente debido a la naturaleza de los materiales de construcción del que está compuesto.

La evaporación multiefecto, se trata de una serie de evaporadores en cuyo interior la presión decrece progresivamente del primero al último, por lo cual el vapor producido en el primer evaporador se utiliza como medio de calentamiento del evaporador siguiente, a la vez este condensa a líquido. El último efecto, o evaporador, precisa de un sistema externo de enfriamiento, se suele emplear un condensador de bulbo húmedo, que a efectos prácticos resulta ser una torre evaporativa cerrada, que consume una modesta cantidad de agua comparada con las de tipo abierto.

Las ventajas del sistema multiefecto, respecto al monoefecto o simple efecto, consisten en el ahorro del fluido de calentamiento, debido al disfrute más efectivo de la energía térmica y a la del agua de enfriamiento ya que el propio liquido a evaporar contribuye a la condensación parcial del vapor producido.

Para calentar el primer efecto se emplea agua caliente a 90 ℃, vapor o agua caliente sobrecalentada. Se calcula que para evaporar 1 kg de agua, es decir pasar de líquido a vapor se precisan 540 Kcal, si este vapor se aprovecha en una segunda etapa permite evaporar otro kg de agua, sin consumir más energía, si se instala otro efecto, permite nuevamente evaporar otro kg de agua. Es decir, con un triple efecto se logra, en teoría, con 540 kcal evaporar 3 kg de agua. Para conseguir este calor se suelen emplear calderas de gas o gasoleo. Otra posibilidad muy interesante es aprovechar el circuito de agua caliente procedente de un equipo de cogeneración, de esta forma el rendimiento energético es total. No hay duda que se trata del sistema de más bajo coste de gestión energética de cuantos existen para tratar caudales altos.

Otra gran ventaja del proceso de múltiple efecto es que se puede empezar con un doble efecto, dos calderas, para producir 5.000 l/día de destilado, y ampliar en el futuro insertando un tercer módulo o caldera para producir 7.500 l/día, es decir un 50% más de producción sin mayor coste energético y bajo coste de inversión.

El punto 6 del DVD adjunto muestra un ejemplo de aplicación.

5. Técnicas químicas

Los tratamientos químicos de residuos consisten en provocar alteraciones en la naturaleza química original de los mismos. Mediante el uso de tecnologías y reactivos químicos adecuados se provocan reacciones para convertir a los residuos en otras sustancias que no sean perjudiciales para el medio ambiente, o bien que permitan su reutilización en algún proceso industrial.

Esta opción es aplicable principalmente a residuos inorgánicos, los cuales pueden ser sometidos a una gran variedad de procesos, encaminados a convertir los componentes tóxicos y solubles en el agua, en otros productos inocuos, insolubles o inertes, pudiendo ser separados del medio acuoso por decantación o filtración. El efluente no tóxico resultante es evacuado a una alcantarilla o a un curso natural de agua. El sólido inerte es depositado en un vertedero adecuado.

Por ejemplo, los cianuros pueden ser oxidados a cianatos (solubles y no tóxicos) por tratamiento con hipoclorito sódico, ácido caro (ácido peroximonosulfúrico, H_2SO_5), etc. Los metales pesados en disolución son convertidos en hidróxidos insolubles u óxidos hidratados al tratarlos con álcalis, como hidróxido sódico o hidróxido cálcico. Algunos iones metálicos de elevado número de valencia deben ser reducidos antes de poder ser precipitados en forma de hidróxidos. Este sería el caso del cromo hexavalente, que es reducido por el SO_2 a cromo trivalente; de esta forma puede separarse el catión mediante su precipitación en forma de hidróxido, eliminando la elevada toxicidad de la especie hexavalente inicial.

5.1. PRECIPITACIÓN QUÍMICA

La precipitación química es la formación de compuestos insolubles a partir de los reactivos químicos adecuados. La precipitación aplicada a los residuos consiste en un proceso que permite extraer y concentrar los compuestos inorgánicos de las corrientes líquidas con bajas concentraciones de contaminantes. El sólido precipitado puede someterse a un tratamiento posterior.

El método consiste, básicamente, en insolubilizar los metales pesados presentes en la corriente residual a base de añadir compuestos químicos que alteren las condiciones y parámetros químicos, principalmente el pH, con el fin de provocar la precipitación. Dichos compuestos son:

- Hidróxido de cal, de sodio y de magnesio ($Ca(OH)_2$, NaOH y $Mg(OH)_2$).
- Carbonato sódico (Na_2CO_3).

- Fosfato trisódico (Na_3PO_4).
- Sulfato sódico (Na_2SO_4).
- Sulfato ferroso ($FeSO_4$).

Estos compuestos anteriormente citados precipitan los metales pesados en forma de los correspondientes hidróxidos y sales. La operación requiere de la ayuda de un floculante y un tiempo que oscila entre 90 y 150 minutos.

Existen diferentes técnicas para la eliminación de sustancias interferentes en agua mediante la precipitación química. A continuación se detallan algunos métodos para la eliminación de algunas sustancias químicas presentes en el agua:

- Eliminación de iones calcio y magnesio. El método más empleado es la descarbonatación con cal, eliminando así la dureza del agua.
- Eliminación de silicio. El silicio puede transformarse en un silito-aluminato complejo de calcio y hierro al añadir al agua cloruro férrico, aluminato sódico y cal; pueden alcanzarse reducciones de silicio del 75%. Otro método empleado para la eliminación de silicio es mediante hidróxido de magnesio.
- Eliminación de fosfatos. Suele precipitarse mediante una sal de calcio o de hierro, en forma de fosfatos de dichos iones.

Los hidróxidos son muy empleados para la eliminación de metales pesados, proporcionando precipitados compactos y filtrables, con la ventaja de que presentan restos de carga electrostática que originan fenómenos de coprecipitación. El inconveniente es que son dependientes del pH, disolviéndose fuera de un intervalo de alcalinidad determinado. Los hidróxidos metálicos alcanzan la menor solubilidad en medio acuoso, a valores de pH entre 7 y 11. El reactivo más empleado es el hidróxido cálcico, y genera precipitados densos y abundantes que precipitan fácilmente. El hidróxido sódico genera precipitados gelatinosos que decantan con dificultad. Los hidróxidos no son capaces de precipitar los metales en forma de complejos; en este caso hay que emplear como precipitantes especies muy poco solubles.

Los sulfuros permiten precipitar bajas concentraciones de metales tóxicos. Su menor carácter anfótero respecto los hidróxidos hace que la solubilidad de sus precipitados sea menos dependiente de las variaciones de pH. El principal inconveniente es la emisión de sustancias tóxicas. El sulfuro más utilizado es el de sodio (Na_2S); es bastante soluble, lo que provoca precipitados muy finos; por esta razón suele ser necesario la adición de coagulantes y floculantes.

La Figura 3.11 muestra la solubilidad de los iones metálicos en equilibrio con el hidróxido precipitado. La ventaja del método estriba en que permite la separación de metales en concentraciones muy bajas a un coste relativamente reducido.

La coagulación y la floculación son dos procesos en los que las partículas se agrupan de forma que su peso específico es superior al del agua y pueden precipitar. La coagulación se refiere a la desestabilización de las partículas, reduciendo las fuerzas de separación entre ellas. La floculación tiene relación con los fenómenos de transporte en el interior del fluido para favorecer que las partículas se agrupen. Esto implica la formación de puentes químicos entre partículas, dando lugar a una malla de coágulos, suficientemente grande y pesada como para poder se-

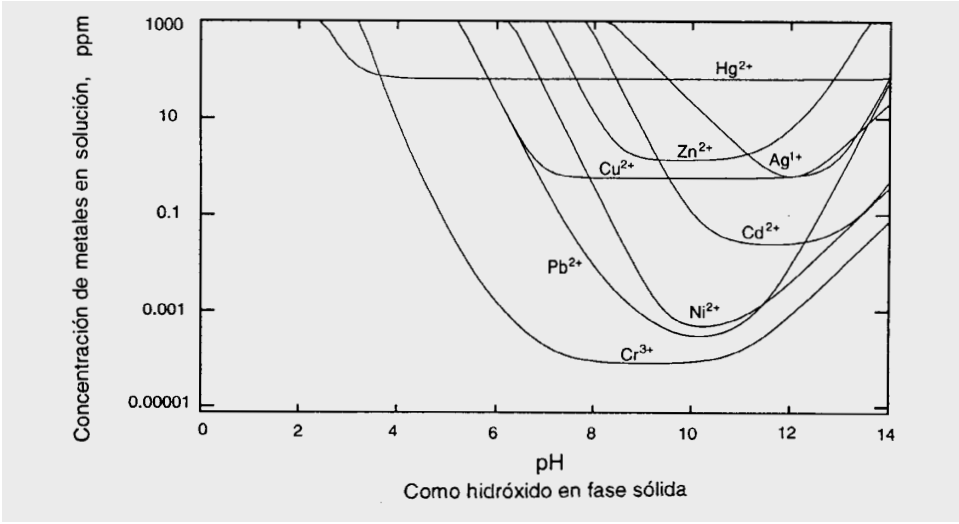


Figura 3.11. Solubilidad de cationes.

dimentar. La floculación es el proceso mediante el cual las moléculas desestabilizadas entran en contacto.

Uno de los coagulantes más empleados es el sulfato de aluminio:

$$Al_2(SO_4)_3 + 6H_2O \rightarrow 2Al(OH)_3 + 6H^+ + 3SO_4^{2-}$$

A medida que la reacción se lleva a cabo va disminuyendo el valor de pH. Es importante destacar que la presencia de bicarbonatos en el agua hace que el pH se mantenga relativamente constante, ya que actúan como amortiguadores:

$$Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O + 3Ca(HCO_3)_3 \rightarrow 2Al(OH)_3 + \\ + 6CO_2 + 14H_2O + 3CaSO_4$$

Para evitar la corrosión por el efecto del CO_2 suele añadirse cal al agua, o un compuesto similar, como $Ca(OH)_2$, NaOH o $NaCO_3$. El efecto del coagulante es el barrido, es decir, a medida que precipita la malla de coágulos arrastra consigo las impurezas presentes en el agua.

5.2. HIDRÓLISIS

En los últimos años se ha desarrollado la ya conocida hidrólisis con el objetivo de recuperar innumerables corrientes de residuos que van desde los residuos agrícolas a las silvícolas. Esta reacción se emplea como una primera etapa y, más tarde, una vez disuelto el residuo, se procede a concentrar y a recuperar el material deseado.

La hidrólisis es la reacción del agua con un compuesto determinado. Por regla general esta reacción es lenta y se precisa de la activación de otros parámetros, como el pH o la temperatura, para que tome unas dimensiones industrialmente interesantes.

Cierto número de álcalis y iones de metales pesados pueden catalizar la hidrólisis de una gran variedad de ésteres orgánicos. Esta propiedad se ha utilizado para la aplicación de esta tecnología a la depuración de ciertas aguas residuales. Una medida fácil para seguir la potencial utilidad de una reacción de hidrólisis para la detoxificación de aguas residuales, es la fuerza de enlace del objeto de la hidrólisis. Cuanto más fuerte es el enlace, menor es la efectividad de la hidrólisis como tecnología de tratamiento. Básicamente, la hidrólisis es una transformación química de un sustrato molecular con lo que cambia su identidad, propiedades físicas y toxicidad. Aunque hay que reconocer que los resultados han sido de momento modestos, esta tecnología está llamada a ocupar un importante lugar en el futuro.

Una variante, o combinación, es la llamada hidrólisis química térmica que está siendo ensayada para las tecnologías de tratamiento de fangos de EDAR deshidratados. Los puntos básicos son:

- La hidrólisis térmica rompe y disuelve la mayoría de polímeros presentes haciéndoles asequibles a la futura digestión anaeróbia.
- Incrementa la biodigestibilidad del sustrato y en consecuencia aumenta la cantidad de biogás.
- Destruye muchos patógenos.
- Logra una mayor deshidratación, llegando hasta un 35% de sequedad.

5.3. OXIDACIÓN QUÍMICA

La oxidación química es un proceso en el que una sustancia transfiere electrones para transformarse en otra especie. Este sería el caso del arsenito, que se oxida a arseniato, especie menos tóxica. En el arsenito, el arsénico está con valencia, o estado de oxidación, 3, mientras que en el arseniato está con valencia 5; es decir, una especie se oxida cuando pierde electrones. A continuación se muestra la reacción de oxidación del arsenito:

$$AsO_2^- \rightarrow AsO_4^{3-}$$

Algunos ejemplos de oxidantes químicos habituales son los siguientes:

- *Hipoclorito sódico (NaClO).* Es uno de los oxidantes más empleados, sobre todo en la desinfección de agua potable. El hipoclorito puede oxidar los sulfuros a sulfatos, e incluso eliminar cianuros, siempre que se mantenga un valor de pH del medio superior a 11. También puede emplearse para la eliminación de amoniaco, manteniendo unos valores de pH entre 8 y 10. Su principal inconveniente es que puede formar trihalometanos (THM).
- *Dióxido de cloro (ClO_2).* Este compuesto es muy inestable, por lo que debe ser producido *in situ* a partir de ácido clorhídrico y clorito sódico. Como biocida tiene unas propiedades superiores a las del hipoclorito sódico, y una concentración residual de 0,2 ppm es efectivo para evitar la proliferación de sustancias patógenas. Una de sus ventajas es que mantiene una eficacia constante en un rango de pH entre 4 y 10.

- *Permanganato potásico ($KMnO_4$).* Este compuesto está muy bien considerado debido a su potencial oxidante y a los pocos subproductos que genera, siendo el MnO_2 empleado como coagulante en medios básicos: de esta forma se puede retirar fácilmente el manganeso empleado, a la vez que se eliminan los sólidos en suspensión presentes en el medio. Suelen emplearse para la oxidación de sulfuros a azufre elemental, arsenitos a arseniatos, y cianuros a nitrógeno molecular en medios muy básicos.
- *Peróxido de hidrógeno (H_2O_2).* Este producto químico no genera subproductos peligrosos en su reacción, por lo que ambientalmente puede considerarse como «inocuo». Puede degradar los compuestos orgánicos, disminuyendo la DQO de las aguas residuales, además de oxidar los nitritos a nitratos. Uno de sus inconvenientes es que su reacción es extremadamente exotérmica, lo que origina problemas en su utilización.
- *Ozono (O_3).* El ozono es uno de los oxidantes más fuertes que se conocen, capaz de oxidar los compuestos orgánicos insaturados alifáticos a alcoholes y aldehídos, y los cianuros a cianatos. Una de sus ventajas en que también puede eliminar los complejos de níquel, otrora de difícil tratamiento.

5.4. REDUCCIÓN QUÍMICA

Como en el caso de la oxidación química, la reducción tiene lugar cuando hay una transferencia electrónica entre especies. La especie reductora actúa cediendo electrones y aumentando su estado de oxidación, es decir, se oxida, a la vez que otra especie acepta los electrones reduciéndose. La siguiente reacción muestra la reacción de transferencia electrónica entre el zinc (reductor) y el ión cobre divalente:

$$Zn + Cu^{2+} \rightarrow Zn^{2+} + Cu$$

La reducción de sulfatos procedentes de vertidos industriales únicamente se lleva bajo condiciones anaerobias, según la siguiente reacción:

$$SO_4^{2-} + \text{materia orgánica} + \text{bacterias reductoras} \rightarrow \rightarrow S^{2-} + H_2O + CO_2$$

Las bacterias reductoras son eficaces incluso a valores extremos de temperatura, salinidad y presión. El principal problema es el olor generado por los sulfuros generados. Una elevada concentración de oxígeno en el agua previene las condiciones anaerobias y permite la reoxidación del H_2S producido. Elevados valores de DBO contribuirán al agotamiento del oxígeno y a promover el metabolismo de formación de sulfuros.

A continuación se presentan diversas especies químicas habitualmente empleadas como compuestos reductores:

- *Ión ferroso (Fe^{2+}).* Compuesto muy eficaz contra los cromatos, a valores moderados de pH, lo que le hace en ocasiones mejor que los reductores derivados del azufre. Una de sus ventajas es que cuando pasa a ión férrico (Fe^{3+}) actúa como coagulante en medios básicos.
- *Dióxido de azufre (SO_2).* Este gas soluble en agua es fuertemente reductor, muy empleado como agente blanqueante en aquellas aplicaciones en las que no es adecuado usar el hipoclorito sódico.
- *Metabisulfito sódico ($NaHSO_3$).* Este compuesto actúa mejor a valores de pH bajos, pudiendo oxidar los nitritos a nitrógeno molecular.
- *Tiosulfato sódico ($Na_2S_2O_3$).* Especie muy reductora, debido a su capacidad de pasar a sulfato. Especialmente útil para la reducción de cromo hexavalente a cromo trivalente.
- *Hidracina (N_2H_4).* La hidracina es un compuesto muy apreciado desde el punto de vista medioambiental, dado que como subproductos genera nitrógeno molecular y agua. Puede emplearse para la reducción del cobre desde su forma iónica a la forma metálica, fácilmente precipitable.

5.5. OXIDACIÓN HÚMEDA

El rápido desarrollo de las tecnologías, tan habitual en la actualidad, y de los nuevos productos industriales en continuo cambio y mejora, lleva aparejado consigo el incremento de la cantidad y el número de residuos sólidos y peligrosos generados. Esta generación de residuos con características más complejas y muchas veces desconocidas, conlleva un aumento del riesgo potencial de contaminación ambiental.

Surge, pues, la necesidad de desarrollar nuevas tecnologías, como la oxidación húmeda, para tratar en un futuro la mayoría de los residuos generados en actividades industriales de una forma eficiente y a un coste económico y medioambiental razonable.

La oxidación húmeda consiste en destruir compuestos orgánicos de elevada DQO, mediante la acción del oxígeno a elevada presión y temperatura, transformándolos en dióxido de carbono y otros compuestos biodegradables.

El proceso se realiza a temperaturas comprendidas entre 175 y 350 ℃ y a presiones que oscilan entre 20 y 100 atmósferas. La reacción es exotérmica y, una vez iniciada, permite su mantenimiento, reduciéndose considerablemente el consumo de combustible. Una de las aplicaciones principales de esta tecnología reside en la gestión de aguas residuales no biodegradables y de muy elevada DQO. Es un proceso muy eficiente que debe trabajar a alta presión, por lo que se requiere de energía para comprimir el oxígeno. Las principales características de un proceso de oxidación avanzada son:

- Elevada disolución del oxígeno.
- Gran velocidad de reacción.
- Elevada eficacia en la eliminación de contaminantes.
- Genera CO_2 y H_2O como productos mayoritarios.

Ya se han llevado a cabo algunas prácticas con la oxidación húmeda sobre residuos industriales; sería el caso de residuos de industrias vinícolas. Este tipo de actividad genera unos residuos con un elevado poder contaminante debido a su alta carga orgánica. Habitualmente estos residuos se tratan mediante un proceso fisicoquímico seguido de un tratamiento biológico anaerobio. Un método alternativo es la oxidación húmeda a alta presión y temperatura. De esta forma se ha conseguido eliminar una gran parte de la carga orgánica, obteniendo como subproductos dióxido de carbono y ácidos de cadena corta. Es importante destacar la ausencia de monóxido de carbono y metano, lo que sería indicativo de una oxidación incompleta.

5.5.1. Oxidación húmeda con peróxido (OHP)

La oxidación húmeda con peróxido es muy adecuada para el tratamiento de efluentes residuales en los que los procesos convencionales (tratamiento fisicoquímico, biológico, desinfección con hipoclorito sódico, etc.) no son eficientes. El proceso OHP consiste en la oxidación de la materia orgánica empleando los radicales libres generados a partir del peróxido de hidrógeno. Es eficaz para la eliminación de los siguientes compuestos tóxicos: cloraminas, compuestos orgánicos policíclicos, antibióticos, cianuros complejos, naftalenos, antracenos, etc. El esquema del proceso OHP se muestra en la Figura 3.12.

5.5.2. La tecnología Fenton

Las corrientes acuosas que provienen de la mayoría de las industrias químicas, petroquímicas y farmacéuticas contienen compuestos orgánicos, como bencenos, fenoles, derivados aromáticos clorados, cloraminas, DDT, PCB, antracenos, éteres, cianuros, antibióticos, mezclas de alcoholes, todos ellos difícilmente degradables, tóxicos y muy peligrosos. Su descarga al medio ambiente constituye uno de los problemas más comunes en este tipo de industrias.

La mayoría de estos afluentes antes de ser vertidos al medio ambiente, son tratados con métodos físicos, químicos o biológicos. Los tratamientos biológicos generalmente son más económicos que los fisicoquímicos (por el consumo de reactivos y el control del proceso exigente), pero son muy sensibles a cambios en las corrientes de alimentación y requieren grandes volúmenes de almacenamiento dado que los tiempos de retención hidráulicos pueden ser de varios días.

Además, han muchos compuestos orgánicos, refractarios a los tratamientos biológicos porque son poco o nada biodegradables o porque se encuentran

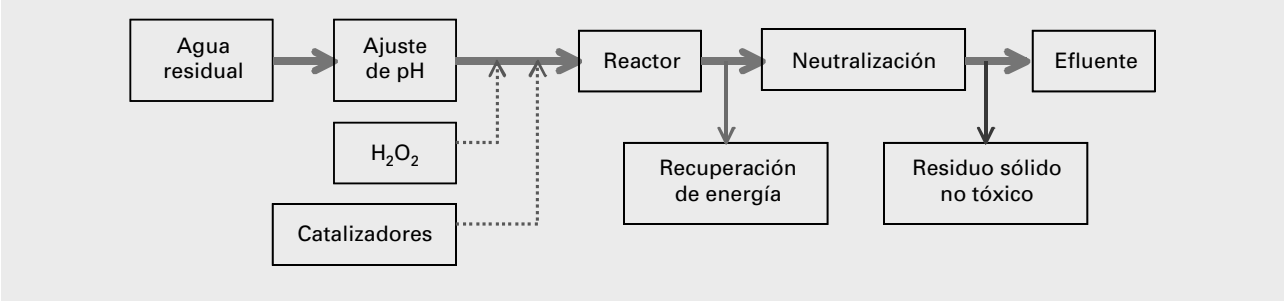


Figura 3.12. Esquema del proceso de oxidación húmeda con peróxido (OHP).

en proporciones en las cuales llegan a ser biocidas (provocan la muerte de la biomasa).

Desde hace algunas décadas, existe una búsqueda exhaustiva de combinaciones de métodos fisicoquímicos y biológicos, que posibiliten una degradación de los compuestos orgánicos contaminantes, sin producir efectos colaterales y que sean económicamente viables.

Una alternativa especialmente relevante que ha ido adquiriendo fuerza en el campo del tratamiento de afluentes acuosos industriales, es el tratamiento químico por oxidación catalítica, previo al tratamiento biológico, y que se basa en utilizar peróxidos y catalizadores para oxidar y/o reducir la materia orgánica contaminante.

Dentro de las ventajas de esta tecnología sobre los métodos fisicoquímicos convencionales (cloración, adsorción en carbón activo, coagulación-floculación, oxidación con permanganato, etc.), se encuentra:

- Provoca un cambio estructural en los compuestos orgánicos que permite un eventual tratamiento biológico posterior (en el caso de los compuestos poco o nada biodegradables).
- Consigue una oxidación total o parcial de estos compuestos, dando lugar a sustancias inocuas, que en algunos casos posibilitan una descarga segura a cauce público.
- Son muy útiles para contaminantes refractarios que resisten otros métodos de tratamiento, principalmente el biológico.
- Sirven para tratar contaminantes a muy baja concentración (por ejemplo, aguas con contaminantes en concentraciones de ppb).
- No se forman subproductos de reacción, o se forman en baja concentración.
- Son ideales para disminuir la concentración de compuestos formados por pretratamientos alternativos, como la desinfección.
- Generalmente, mejoran las propiedades organolépticas del agua tratada.
- En muchos casos, consumen mucha menos energía que otros métodos (por ejemplo, la incineración).
- Eliminan efectos sobre la salud de desinfectantes y oxidantes residuales como el cloro.

Cuando se usa peróxido de hidrógeno (H_2O_2) como reactivo y hierro (II) como catalizador, se conoce como método Fenton. La metodología del proceso de Fenton consiste en tratar el afluente acuoso con peróxido de hidrógeno al 35 o 50% y Fe (II) en forma de sal, habitualmente se usa sulfato ferroso heptahidratado.

El peróxido de hidrógeno es uno de los oxidantes más fuertes y uno de los más utilizados en los tratamientos de aguas, puesto que no produce compuestos clorados, no genera precipitados, no es biocida y su descomposición da como resultado agua y oxígeno, que proporciona un aumento indirecto de la biodegradabilidad del afluente tratado.

El peróxido de hidrógeno por si solo reacciona con algunos contaminantes orgánicos, como por ejemplo compuestos nitrogenados, compuestos sulfurados como el ácido sulfhídrico (en condiciones alcalinas) mercaptanos, tioles, etc. obteniendo sustancias menos tóxicas. Pero aún y siendo muy selectivo en la oxidación, es poco efectivo cuando trabaja solo.

En cambio, si el peróxido de hidrógeno trabaja en presencia de catalizadores cómo puede ser el Fe (II), aumenta significativamente su efectividad, favoreciéndose la formación de radicales hidroxilos (•OH) y hidroperóxidos ($\bullet HO_2$) que son los agentes responsables de la oxidación y/o reducción de contaminantes.

En la Tabla 3.5 se presenta algunos de los compuestos orgánicos más frecuentemente tratados mediante el proceso Fenton.

El mecanismo de reacción del peróxido de hidrógeno en presencia de iones ferrosos, en medio ácido sigue las siguientes reacciones:

$$Fe^{2+} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{3+} + OH^{\bullet} + {}^{\bullet}OH \qquad \text{(ec. 1)}$$

$$Fe^{3+} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{2+} + {}^{\bullet}HO_2 + H^{+} \qquad \text{(ec. 2)}$$

$$OH + RH \rightarrow R\bullet + H_2O \qquad \text{(ec. 3)}$$

$$R\bullet + H_2O_2 \rightarrow ROH + {}^{\bullet}OH \rightarrow \rightarrow \text{productos oxidados} \qquad \text{(ec. 4)}$$

Cómo puede verse, la reacción de Fenton (ec. 1) comprende la producción de radicales hidroxilos (•OH) por la acción de los iones ferrosos con el peróxido de hidrógeno, liberándose además iones férricos.

Estos radicales hidroxilos reaccionan indiscriminadamente y de forma no selectiva con la materia orgánica, RH (ec. 3), por hidroxilación (oxidación de los dobles enlaces).

Cómo es sabido, la hidroxilación de los compuestos orgánicos es un paso necesario para la degradación biológica, e incrementa la solubilidad de éstos (se pasa de moléculas con dobles enlaces difíciles de romper-degradar a moléculas con grupo fácilmente saliente, un grupo hidroxilo, OH^-). Como

Tabla 3.5. Compuestos orgánicos susceptibles de oxidación mediante reactivo de Fenton (Bidga *et al.*, 1995; Nesheiwat *et al.*, 2000, Nadarajah *et al.*, 2002).

Ácidos	Alcoholes	Aldehidos	Aromáticos	Aminas	Otros
Cadena abierta: Fórmico Propiónico	*Cadena abierta:* Metanol Etanol Isopropanol Pert-Butanol Alcohol polivinílico	*Cadena abierta:* Formaldehído Acetaldehído Isobutiraldehido Gioxal	*Monocíclicos:* Benceno Fenol	*Cadena abierta:* Dietalamina Dimetilformamida n-Propilamina Propilendiamina	*Eteres:* THF Organoclorados Tetracloruro de carbono Cloroformo Tricloroetileno
Monosustituidos: Láctico Málico	*Cíclicos:* Fenil metanol (bencílico)	*Cíclicos:* Benzaldehido	*Policíclicos:* Tolueno Xileno Hirdrocarburos poliaromáticos (HAPs)	*Cíclicos:* Anilina	*Cetonas:* Metil etil Cetona Dihidroxiacetona Quinona Hidroquinona Benzoquinona
Polisustituidos: Glucónico Tartárico	*Polioles:* Etilen glicol Glicerol Propilendiol	*Sustituidos:* Tricloro acetaldehido	*Sustituidos:* Clorobenceno Clorofenoles Trinitrotolueno Para-Nitrofenol Nitrobenceno Bifenilos policlorinatos (BPCs)	*Derivados:* Ácido etilen dinitrilo Tetraacético Explosivos (RDX o aciclonita)	*Varios:* Antraquinona Pigmentos (mono y diazo) PCBs

en la reacción de Fenton precisamente esto es lo que ocurre, este tratamiento químico incrementa la biodegradabilidad de los afluentes tratados, facilitando así los tratamientos biológicos posteriores.

Además, cuando se llevan a término reacciones tipos Fenton, coexisten además las siguientes reacciones de oxidación-reducción:

$$H_2O_2 + {}^{\cdot}OH \rightarrow {}^{\cdot}HO_2 + H_2O \qquad \text{(ec. 5)}$$

$${}^{\cdot}HO_2 \rightarrow H^+ + {}^{\cdot}O_2 \qquad \text{(ec. 6)}$$

$${}^{\cdot}HO_2 + {}^{\cdot}O_2 \rightarrow HO_2^- + O_2 \qquad \text{(ec. 7)}$$

Los aniones superóxidos e hidroperóxidos son potencialmente reductores en los sistemas Fenton y son los responsables de la reducción de compuestos como las quinonas, el nitrobenceno, tetracloruro de carbono, cloroformo, etc. Por otro lado, el anión hidroperóxido es un agente reductor y nucleófilo capaz de reducir benzoquinonas y otras cetonas.

El ión férrico (ec. 1) cataliza la producción de radicales hidroperòxidos ($\bullet HO_2$) y protones, reduciéndose a hierro (II) (ec. 2) dando así el aspecto autocatalítico de la reacción.

Esta reacción secundaria, pero no menos importante, puede ser activada por la vía de radiación UV y/o UV-Vis, por fotoxidación del ión férrico a ión ferroso, incrementando la concentración de radicales hidroxilos, mediante la siguiente reacción:

$$Fe_3^+ + H_2O \xrightarrow{h\gamma} Fe_2^+ + \bullet HO + H^+ \qquad \text{(ec. 8)}$$

Si la aportación de radiación es mediante luz solar, a este proceso se le conoce como detoxificación solar y si proviene de otras fuentes de radiación, foto-fenton.

El proceso Fenton se realiza habitualmente a presión atmosférica y temperatura ligeramente superior a la ambiental (40-50 ℃). La velocidad de oxidación de los compuestos aumenta con la temperatura pero no es recomendable trabajar en temperaturas superiores a 60 ℃ puesto que se acelera la descomposición del peróxido de hidrógeno (en oxígeno y agua), y puede llegar a hacer «hervir» el medio de reacción. No obstante, se recoge en la literatura que operando a presiones hasta tres atmósferas es posible llegar a temperaturas de hasta los 100 ℃ sin riesgo de descomposición del peróxido.

Otro de los factores limitantes de la reacción es el pH del medio reactor. El pH óptimo de la reacción ha de estar comprendido entre 2 y 4.

Un incremento del pH (por encima de 4) disminuye la solubilidad de los iones férricos, convertidos a partir de los iones ferrosos, que precipitan como un complejo oxihidróxido amorfo ($Fe_2O_3 \cdot nH_2O$), minimizando la formación de radicales hidroperóxidos. A un pH inferior a 2, tiene lugar la inhibición inicial entre el Fe (III) y el H_2O_2 (ec. 2).

Como consecuencia de todos estos efectos la eficiencia de la reacción disminuye bruscamente porque se reduce la formación de iones Fe (II) y por lo tanto de radicales hidroxilos.

Existe la posibilidad de agregar agentes «quelantes» al medio de reacción, que mantengan el hierro en suspensión y permitan desarrollar la reacción en un medio neutro o alcalino. Generalmente se usan compuestos biodegradables como el catecol (1,2 dihidroxibenceno) o el ácido gálico (3,4,5 trihidroxibenzoico). Y aunque esta forma modificada de la reacción de Fenton no es tan eficiente como la reacción sin modificar, tiene la ventaja que es directamente compatible con un proceso de biodegradación posterior, puesto que se trabaja en pH próximo a 7-8 desde el comienzo, y además no se generan lodos cuando se ajusta el pH una vez la reacción de Fenton se ha finalizado.

Las relaciones H_2O_2: Fe(II) van desde 2:1 hasta 300:1 dependiente de cada afluente, de su composición y la toxicidad y sobre todo del compuesto a degradar. Sin embargo, en la práctica habitual y cuando se utiliza el proceso de oxidación catalítica Fenton como precursor al tratamiento biológico, se evita la utilización de concentraciones elevadas de reactivos, en particular de peróxido de hidrógeno que provoquen la oxidación completa de los contaminantes, por motivos económicos y de control en la exotermia del proceso. Normalmente se realiza la oxidación parcial de los compuestos para que se conviertan en productos más solubles y menos tóxicos y que faciliten e incrementen la degradación biológica, o simplemente para inducir el cometabolismo de los compuestos originales.

Finalmente, las formas comunes de operar por método Fenton son en discontinuo, tratamiento por lotes o en continuo. Esta última modalidad es menos frecuente que el primero.

El tratamiento por lotes, el más habitual, es muy flexible a variaciones en la composición de la carga, pero sólo es económicamente eficiente para pequeños volúmenes, por ejemplo lotes que contienen mezclas de disolventes, muy típicas en las industrias de química fina o farmacéutica. Los principales inconvenientes del proceso por lotes es la baja automatización del proceso y la limitación que impone el control de la exotermia del proceso.

5.5.2.1. Algunas aplicaciones industriales del método Fenton

Fenoles y compuestos aromáticos en disolución: En las aguas residuales procedentes de la fabricación de productos químicos, farmacéuticos, plásticos y derivados del petróleo es frecuente encontrar disoluciones acuosas conteniendo fenoles o compuestos aromáticos derivados, que en la proporción en que se encuentran no es viable económicamente la recuperación de los mismos, pero añaden una carga contaminante considerable a los afluentes acuosos. Además, comunican al agua gustos y olores desagradables e impide que puedan ser abocados al medio receptor directamente puesto que los límites en las descargas son muy estrictos cuando éstos están presentes.

Teniendo en cuenta que el fenol es un compuesto bastante biodegradable, los métodos de tratamiento de estas aguas son habitualmente biológicos. Los sistemas biológicos (filtros percoladores, lagunas de aireación, etc.) son efectivos en general, pero son muy sensibles a altas concentraciones, o puntas de contaminación. Para evitar que se pueda echar a perder todo una biomasa especializada, normalmente se tratan los afluentes químicamente previo al tratamiento biológico.

La técnica más usada para eliminación de los compuestos fenólicos es la oxidación, pero con peróxidos ya que la cloración genera como subproductos compuestos fenólicos clorados que son extremadamente tóxicos.

Se usa la oxidación catalítica por método Fenton. Esta reacción sobre el fenol o compuestos aromáticos derivados, produce inicialmente hidroquinona y catecol y continúa la reacción hasta la descomposición en ácido carboxílico y finalmente a dióxido de carbono y agua, producto final totalmente inocuo para el medio ambiente.

Afluentes coloreados procedentes de industrias como papeleras o textiles. El efecto del proceso Fenton es la decoloración de estos afluentes debido a la acción oxidante del grupo hidroxil que reacciona rápidamente y de manera no selectiva con las moléculas que contienen grupos azo- (responsables de la coloración) provocando la rotura de los dobles enlaces, C–C insaturadas, consiguiendo la eliminación del color.

Descontaminación de aguas residuales procedentes del lavado de envases de plásticos recuperados y reutilización de este agua para el riego de cultivos. Usando la técnica antes mencionada de detoxificación solar, se consigue destruir fotocatalíticamente, los contaminantes orgánicos persistentes disueltos en el agua de lavado, usando como último paso la luz solar, y a temperatura ambiente, para recuperar el catalizador y generar más grupos hidroxilos, responsables de la oxidación. Se obtiene un agua

que por su contenido en COT (carga contaminante total) cumple los límites de conductividad establecidos en la normativa, y es apta para el riego de cultivos próximos.

Esta tecnología se llevó a cabo en la Plataforma Solar de Almeria (PSA) y con tecnología desarrollada por el Ciemat.

En el tratamiento de los afluentes petrolizados: Estos afluentes ricos en hidrocarburos de cadenas largas y muy poco biodegradables se someten a una secuencia de degradación que consta de tres etapas: tratamiento biológico (normalmente anaeróbio para eliminar el mayor contenido en carga contaminante), un tratamiento oxidativo por Fenton y finalmente un tratamiento biológico (de nuevo anaeróbio o aeróbio para acabar de eliminar compuestos contaminantes).

El proceso oxidativo por Fenton transforma parcialmente los hidrocarburos no digeridos en la primera fase, en compuestos más solubles en agua y a la vez más biodegradables, siendo más fácilmente digeridos en la tercera fase.

En la degradación de afluentes con tensioactivos (sustancia con grupos hidrófilos y hidrófobos responsable de la formación de emulsiones y micelas) vía eliminación de las propiedades tensioactivas:

- Aniónicos, hasta el 90% o más.
- Nonilfenol y etosilatos, hasta el 90%.
- Alcohol etosilati, hasta un 85%.
- No iónico, antiespuma, hasta 90%.
- Cationes hasta un 90% o más.

5.6. FOTOCATÁLISIS

El proceso de destoxificación solar mediante fotocatálisis consiste en una utilización de la parte más energética del espectro solar como es la radiación ultravioleta para promover una reacción de oxidación muy energética. Esta reacción tiene lugar cuando dicha radiación ultravioleta activa un catalizador semiconductor que usualmente es dióxido de titanio en presencia de oxígeno. En estas circunstancias cualquier otra sustancia (tóxica o no), que se encuentre simultáneamente en el mismo medio es oxidada hasta su descomposición total.

Una característica intrínseca al proceso es la presencia de un catalizador semiconductor. Es precisamente la radiación ultravioleta la única lo suficientemente energética como para excitar dicho catalizador y provocar un salto electrónico desde la banda de valencia a la banda de conducción. Estos electrones móviles sobre la superficie del catalizador en presencia de oxígeno (u otro agente oxidante), generan unos radicales fuertemente oxidantes que son los que se encargan de atacar y destruir cualquier sustancia susceptible de ser oxidada que se encuentre en el medio. El proceso además tiene lugar a temperaturas que oscilan entre 30 y 80 ℃ sin que su variación apenas le afecte.

La técnica aplicada industrialmente se basa en la utilización de la fracción del ultravioleta cercano (UV-A) de la radiación solar mediante la acción de un catalizador que genera radicales hidroxilo (OH^-) que posen una potente acción oxidante. En ciertas condiciones de presión y temperatura estos radicales mineralizan la materia orgánica a CO_2 y agua. Es una técnica útil para detoxificar:

- Aguas fenólicas.
- Aguas con pesticidas.
- Aguas subterráneas contaminadas con disolventes clorados e hidrocarburos de difícil degradación.

El proceso más estudiado es el de contaminantes disueltos en agua pero también funciona igualmente con gases. El único requisito en ambos casos es que la concentración inicial de contaminantes ha de ser baja para poder obtener degradaciones totales del mismo.

Esta reacción ha sido amplia y extensamente estudiada a escala de laboratorio en estos últimos años despertando un gran interés gracias a los prometedores resultados obtenidos. El proceso además presenta una serie de ventajas que lo hacen realmente único.

Es un método que realmente destruye desde sustancias tóxicas hasta compuestos totalmente inocuos. En el caso de sustancias orgánicas los subproductos que se obtienen son agua, CO_2 y simples ácidos inorgánicos.

El proceso es capaz de destruir prácticamente cualquier tipo de sustancia orgánica, incluidas mezclas complejas. En este sentido es capaz de descomponer incluso sustancias difíciles o peligrosamente tratables por otros métodos como es el caso de dioxinas, bifenilos policlorados, disolventes, pesticidas, etc.

Las sustancias contaminantes son eliminadas en un único proceso sin necesidad de ser separadas previamente del medio en el que se encuentran disueltas. El aporte de energía necesario es muy pequeño, procediendo además de una fuente limpia como es la energía solar.

La sustancia o compuesto cuya descomposición se quiere ensayar se añade al agua anterior a la concentración deseada y posteriormente se adiciona al catalizador. Dicho catalizador, como se ha indicado, normalmente es dióxido de titanio (TiO_2) compuesto abundante, barato, no tóxico y fácil de conseguir ya que usualmente se utiliza para la fabricación de pinturas.

En procesos de destoxificación la concentración de catalizador más generalizada es de unos 100 mg/l. Unas turbinas agitadoras se encargan de homogeneizar perfectamente la mezcla antes de su entrada al proceso. Esta mezcla final se hace circular a través del reactor (conjunto de tubos absorbedores), con los colectores en seguimiento solar. El ordenador, en comunicación con el Sistema de Adquisición de Datos (DAS), se encarga de controlar el proceso así como de recibir y almacenar las magnitudes de las variables que recibe constantemente de los distintos sensores físicos (temperaturas a lo largo del lazo y ambiente, presiones en el circuito, caudales, etc.), químicos (pH en distintos puntos del lazo y concentración del oxígeno al final del mismo), y meteorológicos (radiación ultravioleta global directa sobre el plano horizontal y vertical), situados en la línea a lo largo del lazo.

El ordenador va creando una serie de archivos históricos con estos datos y algunos de ellos los utiliza como parámetros de entrada para el control del sistema.

5.7. SONOQUÍMICA

La aplicación de ultrasonidos a una disolución química puede permitir alcanzar, sin ningún peligro y por métodos relativamente simples, temperaturas localizadas tan altas como las de la superficie del Sol y presiones elevadísimas.

La vida media de este fenómeno se mide en microsegundos y, frecuentemente, permite incrementar las reactividades químicas por factores superiores al millón de veces. Desde hace pocos años los científicos están aprendiendo a conocer y dominar esta nueva técnica, la sonoquímica,

Los ultrasonidos son sonidos no perceptibles por los humanos. Son ondas de comprensión y expansión, que han de propagarse en medios materiales, es decir, a través de sólidos, líquidos o gases, y que han de poseer un rango de frecuencia comprendido entre 20 hertzios y 16 kilohertzios. Un hertzio significa un ciclo de comprensión o expansión por cada segundo. Un sonido alcanza la clasificación de ultrasonido si su frecuencia supera los 16 kilohertzios, por lo que resultará, en principio, inaudible aunque su intensidad fuese superior a la de un motor a reacción.

El uso práctico de los ultrasonidos está bastante generalizado. Ejemplos cotidianos son: soldadores y perforadores ultrasónicos, los ultrasonidos para disgregar cálculos renales o biliares, o los baños de limpieza ultrasónica. Sin embargo, es interesante ahondar en los efectos de los ultrasonidos de alta intensidad, fundamentalmente sobre medios líquidos, productores del fenómeno conocido como cavitación hidrodinámica, del que se derivan interesantes consecuencias dentro de la química.

Las fuentes de ultrasonidos, con suficiente intensidad, aplicadas a los líquidos producen también el fenómeno de la cavitación. Pero la consecuencia química de ello, la sonoquímica, tan solo se inició hace unos diez años, cuando se pudo disponer en los laboratorios de generadores de ultrasonidos eficientes de alta intensidad. Los ultrasonidos poseen unas longitudes de onda comprendidas entre los 10 centímetros y la centésima de milímetro. Ello significa que su tamaño es muy superior al de las moléculas, por lo que sus efectos no pueden ejercitarse a través de una interacción física directa entre las ondas y las moléculas que son alcanzadas por ellas. Lo que ocurre es que las ondas de ultrasonidos pasan al líquido donde el ciclo de expansión produce una presión tan negativa sobre el líquido que hace que localmente se separen las moléculas del líquido, creando allí una verdadera cavidad.

Usualmente ello tiene lugar en los sitios previamente contaminados de la disolución, aquellos en los que existen pequeñas partículas o microburbujas. Las cavidades así formadas absorben la energía procedente de las ondas ultrasónicas y crecen más o menos rápidamente, según cuales sean diversos parámetros y circunstancias conocidos, hasta llegar a un límite. En ese momento se comprime rápidamente la cavidad gaseosa, se colapsa, se produce su implosión, lo que genera una gran cantidad de calor, que puede alcanzar los 5.000 ℃, junto a una gran presión, que puede llegar a las 1.000 atmósferas, en un proceso de duración casi instantánea.

Todo ello es, pues, un mecanismo que sirve para concentrar, en forma de energía química útil, la energía difusa que portaba la onda ultrasónica.

El abanico de posibilidades que se está abriendo es muy amplio, incluyendo los sistemas líquidos que contienen partículas metálicas en suspensión, se puede conseguir que impacten entre sí a velocidades de unos 2.000 kilómetros/hora, con temperaturas tales que es posible su fusión selectiva. La acción de los

ultrasonidos sobre ciertas mezclas de hidrocarburos ha conducido a resultados semejantes a los que se obtienen mediante los complejos sistemas de pirólisis a alta temperatura.

Para el tratamiento de capas subterráneas contaminadas por compuestos orgánicos se están empleando nuevas tecnologías, como la sonoquímica, que consiste en la generación de un campo de ultrasonidos que forma burbujas mediante cavitación. La energía liberada por la implosión de estas burbujas, la presión que se genera junto al incremento en temperatura y también las fuerzas de cizallamiento y las descargas eléctricas contrubuyen a la formación de radicales libres y a la degradación de los contaminantes orgánicos.

6. Técnicas fisicoquímicas

En el campo del tratamiento y valorización de residuos el empleo del término fisicoquímico parece bien adecuado sin embargo, como se verá no se ajusta a ninguna operación simple más o menos convencional.

6.1. TÉCNICAS DE ARRASTRE

De tecnologías de tratamiento por métodos fisicoquímicos hay de muchos tipos, y su desarrollo tecnológico es continuo. Algunos ejemplos de este método serían los siguientes:

- *Stripping* por aire. Este proceso de transferencia de masa aumenta la volatilización de los compuestos presentes en el agua mediante la inyección de aire, mejorando así la transferencia entre las fases aire y agua. Es aplicable al tratamiento de residuos líquidos para la extracción de compuestos orgánicos volátiles, siendo especialmente adecuado a bajas concentraciones.
- *Stripping* por vapor. Al igual que el *stripping* por aire, está basado en la transferencia de compuestos orgánicos desde la fase líquida a la gaseosa, si bien presenta algunas diferencias funcionales. Suele utilizarse para la extracción de aceites minerales pesados.
- Extracción por vapor del suelo (arrastre por vapor). Es un método de depuración relativamente nuevo, muy utilizado para la eliminación de compuestos orgánicos volátiles. Este proceso consiste en hacer pasar una corriente de aire a través del suelo, produciendo así la transferencia de los contaminantes desde la matriz edáfica al flujo de aire.

6.2. CERAMIZACIÓN Y ENCAPSULACIÓN

Dentro del conjunto de tecnologías existentes para conseguir la inertización y neutralización de los compuestos peligrosos presentes en los residuos, la ceramización y la encapsulación representan las dos opciones estratégicas fundamentales, dado que establecen una frontera entre los residuos confinados en un medio receptor y su comportamiento futuro.

Si el residuo entra a formar parte químicamente del nuevo compuesto su futuro comportamiento será bueno; pero si el residuo es sólo retenido físicamente, sin cambio alguno en su estructura morfológica y/o química, quedará encapsulado y su futura evolución dependerá más del medio donde se halle que de su propia estabilidad y resistencia. En el primer caso se tratará de una ceramización, que viene a ser la verdadera inertización, mientras que en el segundo escenario se deberá hablar de encapsulación.

Todas las interacciones en estado sólido, como las cerámicas, presentan una cinética de reacción extremadamente lenta. El factor capaz de acelerar el proceso es el tamaño de grano: cuanto más fino sea el grano mayor será su superficie específica y mayor su cinética de reacción; por el contrario, cuando el grano tiene un tamaño suficientemente grande queda sin reaccionar.

Por esta razón, cuando el objetivo perseguido es el de inertizar un residuo a causa de su toxicidad es preciso someterlo previamente a una trituración fina. En este caso el residuo funde parcialmente y se integra en la matriz cerámica. Si el tamaño de grano es grosero, la partícula de residuo no interacciona con la matriz cerámica y queda simplemente encapsulado. En este caso, si sufre un impacto mecánico fuerte o es atacado por un agente químico potente, se rompe el velo de protección y la carga contaminante puede ser liberada al exterior.

Establecer la frontera donde el residuo se incorpora en la cerámica o queda encapsulado depende de la distribución granulométrica y de otros factores, como de la reaccionabilidad de la arcilla y el propio residuo. Tal y como muestra la Figura 3.13, un límite prudente sería un tamaño de grano de 500 μm (0,5 mm); por encima de este tamaño el residuo quedará encapsulado, mientras que a valores inferiores se integrará en la matriz cerámica.

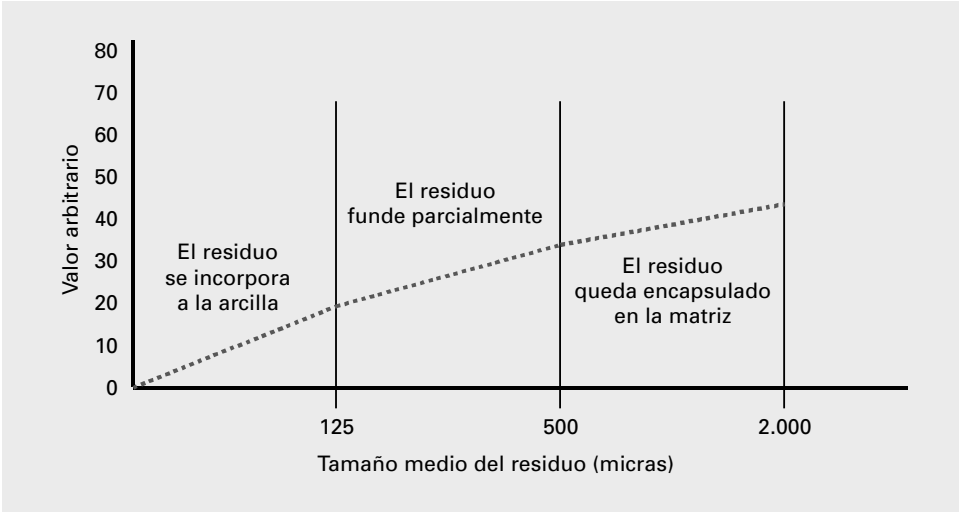


Figura 3.13. Proceso de ceramización vs. encapsulación.

6.2.1. Mecanismo de la ceramización

La arcilla está formada por un conjunto de minerales complejos. Cuando se somete al calor, el gradiente térmico provoca una creciente excitación de las estructuras cristalinas, que se van transformando paulatinamente. La cocción es la última etapa del proceso cerámico y constituye una serie de procesos fisicoquímicos que se inician a partir de reacciones en estado sólido.

A medida que aumenta la temperatura se inicia la formación de la fase líquida, como consecuencia del desmoronamiento de las estructuras cristalinas. Esta fase amorfa, que es líquida a este rango de temperatura, es muy agresiva y conduce a un incremento de las reacciones. La fase líquida se va introduciendo en los intersticios de las micelas de arcilla donde, eventualmente, puede haber cuerpos extraños y/o residuos, y debido a la gran viscosidad, los va atrapando y englobando. Durante este proceso el aire queda ocluido, dando lugar a poros.

Las reacciones más destacadas que tienen lugar durante la cocción de las arcillas de interés cerámico en relación con el tratamiento de residuos son las siguientes:

- *Reacciones de vitrificación.* Se forma abundante fase líquida que a la salida del horno de cocción será una fase amorfa que habrá integrado a los metales pesados presentes; si el tamaño de grano del residuo es considerable lo encapsulará.
- *Destilación de los materiales orgánicos.* Esta propiedad se emplea para la generación de porosidad a partir de residuos orgánicos. Tradicionalmente la porosidad necesaria en la morfología de los materiales cerámicos aislantes se lograba a base de incorporar residuos livianos de otras industrias: corcho, madera, etc. Esta aplicación abre la vía al reciclaje de residuos de naturaleza orgánica.
- *Descomposición de los minerales arcillosos.* Esta es la parte fundamental, ya que sin la presencia de los minerales de arcilla no existiría el proceso cerámico. Todos estos minerales, al llegar a cierta temperatura, rompen los enlaces del agua de constitución y se convierten en sustancias amorfas que, más adelante, iniciarán la formación de la fase líquida.
- *Descomposición de los minerales no arcillosos.* Estas sustancias suelen estar presentes en las arcillas. La arcilla es un material natural y, por naturaleza, su composición depende de la zona donde se ha formado, de los minerales presentes en la zona y de los arrastres que se han ido produciendo a lo largo del tiempo. Ello significa que contenga ciertos compuestos no deseables. Esto sucede en las preparaciones previas a una explotación minera donde los estériles, esencialmente de naturaleza inorgánica, pueden ser perfectamente integrados en masas cerámicas.

En este punto también se pueden incluir los incontables residuos industriales de naturaleza inorgánica, cuya caracterización sea compatible con la naturaleza de los minerales de arcilla y del propio proceso cerámico.

Tabla 3.5. Composición mineralógica cualitativa de minerales y arcillas.

Mineral	Arcilla-1	Arcilla-2	Arcilla-3	Arcilla-4
Cuarzo	¤¤¤¤	¤¤¤¤	¤¤¤	¤¤¤¤
Albita	–	¤	¤	¤¤
Dolomita	✧	¤	¤¤	¤
Calcita	¤	¤¤¤	¤¤¤¤	¤¤¤¤
Hematites	¤	–	–	–
Geotita	–	¤	–	–
Moscovita	¤¤	¤¤	¤	¤
Clorita	¤¤	¤¤	¤	–
Montmorillonita	¤¤	–	–	–
Halita	–	–	¤	–
Anhidrita	–	–	–	¤

6.2.2. La ceramización y su interacción con la valorización de residuos

Cuando se mezclan arcillas con residuos para someterlos a inertización en la matriz cerámica se deben conocer las interacciones que se desarrollarán entre los minerales de arcilla y los diversos componentes de los residuos. Para simplificar el caso, esta explicación se circunscribirá al caso de fangos de EDAR con presencia abundante de metales pesados.

Para comprender la sucesión de reacciones entre los minerales de arcilla y los componentes del fango, la Tabla 3.5 muestra la composición mineralógica de diversas arcillas comunes de interés cerámico y de fangos de EDAR procedentes del área industrial de Barcelona.

En primer lugar, puede observarse que todos los minerales que aparecen en la Tabla 3.5 son de naturaleza inorgánica. De hecho los difractogramas correspondientes a los fangos tuvieron que realizarse sobre muestras calcinadas a 450 ℃ para eliminar la materia orgánica, puesto que distorsionaba la línea base. Cabe indicar que los valores que se expresan en la tabla son cualitativos. Es decir, en el caso de las arcillas se trabaja sobre el 100% del material y las fases mayoritarias son, en el caso de la arcilla-1, el cuarzo, la moscovita y la clorita. En el caso de los fangos se trabaja con el 100% de la materia inorgánica, una vez eliminada el componente mayoritario, es decir, la materia orgánica.

Destaca la similitud de composiciones, lo que demuestra que se trata de compuestos compatibles. A partir de estos datos será más fácil comprender las interacciones de las reacciones fisicoquímicas que se desarrollarán durante la cocción cerámica:

- *Hasta 400-500 °C:* se eliminará el agua de humedad adsorbida, tanto en el caso de la arcilla como, sobre todo, en los fangos. A estas temperaturas también pirolizarán los compuestos orgánicos de los fangos. Los compuestos volátiles son emitidos al interior del horno. Es necesario conocer la naturaleza de la fracción carbonosa resultante de la fase de pirólisis, puesto que puede interferir en la calidad del material final.
- *A partir de 600-800 °C:* se descompone el retículo cristalino de los minerales de arcilla, comenzando por la montmorillonita; también se elimina el agua de constitución y los minerales de arcilla, ahora metaestables, se vuelven reactivos e inician una incipiente formación de fase amorfa que, a estas temperaturas, va siendo paulatinamente menos viscosa. En este momento es cuando se atrapan la mayor parte de los metales pesados presentes, no sólo los de los fangos, sino los que se encuentran de forma natural en las propias arcillas. También a estas temperaturas se descomponen los carbonatos. Tanto el óxido de calcio (CaO) como el de magnesio (MgO) procedentes de las decarbonataciones son poco reactivos y su contribución a la ceramización, entendida como inertización, es mínima. Así pues, se comprende que cuanto mayor sea la cantidad y calidad (fluidez) de la fase líquida procedente de los minerales de arcilla, tanto mayor será la probabilidad de éxito de la integración.

- *A temperaturas próximas a 1.000 °C:* la sílice (SiO_2) procedente de la descomposición de los minerales de arcilla ataca a los óxidos alcalinotérreos presentes y forma nuevas fases minerales. Si la cocción prosigue, a mayores temperaturas funden los feldespatos presentes y la fase líquida puede atacar y fundir a los minerales recristalizados.

La caracterización específica de la fracción inorgánica de los fangos puede ayudar a los procesos cerámicos, en particular si el tamaño de grano de los minerales de arcilla presentes es fino.

6.2.3. Proceso de ceramización

Tal y como ilustra la Figura 3.14, la primera operación que debe llevarse a cabo es la trituración de la arcilla. Esta fase se realiza en molinos cuyo principio de funcionamiento depende de la naturaleza de la arcilla empleada.

Durante la fase de amasado se añade agua a la arcilla triturada; de esta forma se pone de manifiesto la propiedad fundamental de los minerales de arcilla: la plasticidad. Gracias a ella será posible conseguir la cohesión en verde, también conocida como cohesión en húmedo. En la etapa siguiente, la extrusión o el prensado, se conforma el barro húmedo para conferirle la forma geométrica deseada. A continuación, la pieza entra en el secador para extraerle el agua de amasado; finalmente ya se encuentra en condiciones de afrontar la etapa principal de la ceramización: la cocción, que consiste en someter el producto a una temperatura creciente hasta que la viscosidad de la fase líquida cohesiona y rigidiza completamente el conjunto. La cocción se desarrolla en hornos, ya sean de tipo continuo o intermitente, que deben alcanzar, como mínimo, una temperatura de 1.000 ℃.

Desde el punto de vista cerámico, el material cocido puede definirse como un cuerpo complejo compuesto de las siguientes fases:

- Fases cristalinas, ya existentes en las materias primas. Estas fases permanecen inalterables a lo largo del proceso. El ejemplo más conocido y común es el cuarzo (SiO_2), uno de los minerales más abundantes de la corteza terrestre; por esta razón resulta lógico que se halle en la mayoría de las arcillas. Se trata de un compuesto muy refractario, y debido a su relativamente tamaño grande de grano suele permanecer inalterable a los ataques que desencadenan las fases líquidas durante el proceso cerámico.
- Fases amorfas, desarrolladas durante la cocción. Según la especie cerámica estas fases pueden oscilar entre un 50% y un 90% en peso. Se trata de las fases que proceden del desmoranamiento de las estructuras cristalinas de los minerales de arcilla. Por regla general, a partir de 800 ºC, y en función del tipo de mineral de arcilla, estas fases amorfas son parcialmente líquidas, aunque de una viscosidad altísima lo

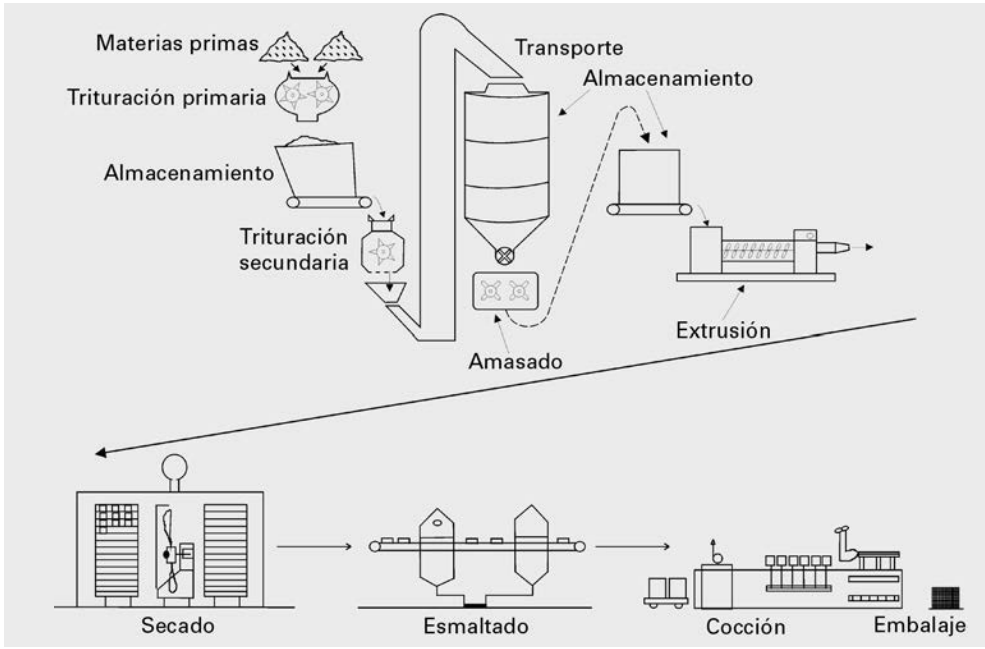


Figura 3.14. Sinopsis del proceso cerámico.

que permite mantener la geometría del cuerpo cerámico. El líquido es muy agresivo y acelera las reacciones. Son estas reacciones las responsables de la inserción en la propia matriz vítrea de los metales pesados presentes en los residuos incorporados en la masa cerámica.

- Fases recristalizadas, a partir del líquido. Dependen de la naturaleza de la fase amorfa y de la velocidad de enfriamiento. En ciertas ocasiones, la adición de residuos incorpora compuestos de naturaleza inorgánica que catalizan las reacciones y ellas mismas ayudan a recristalizar nuevos compuestos.

Desde la óptica ambiental, el hecho de que el componente tóxico que se ha incorporado en la masa cerámica con la intención de inertizarlo forme parte de la fase amorfa o de un compuesto recristalizado es importante, puesto que a igualdad de composición un cristal tiene los enlaces químicos más fuertes que el vidrio del cual procede y en términos ambientales, esto se traduce en que las posibilidades de lixiviación sean mucho menores.

El punto 7 del DVD adjunto muestra una filmación de un proceso cerámico. Asimismo se pueden ver catálogos de materiales cerámicos e instalaciones de cocción. Para mayor información se puede consultar el master a distancia «Tecnología y ciencia cerámica» escrito por el Dr. Xavier Elias y editado por la Fundación Universitaria Iberoamericana (www.funiber.org).

6.3. CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA

Según la Real Academia de las Ciencias, la cavitación es la «formación de burbujas de vapor (cavidades) en el seno de los líquidos, bien por evaporación de los mismos a causa de una disminución de presión, que se produce en la proximidad de los sólidos, que se mueven en contacto con ellos a gran velocidad (rotores de bombas), bien por la acción de ondas sónicas de alta frecuencia. Al reducirse bruscamente las burbujas de vapor, los sólidos mencionados pueden deteriorarse». Es obvio que las burbujas procedentes de la ebullición del agua, o las de origen de un gas ocluido, no entran en esta definición.

A partir de este fenómeno se esta trabajando mucho. Se trata de un sistema de oxidación avanzado que, en España ha sido desarrollado, entre otros, por el CIEMAT para el tratamiento de residuos líquidos de origen ganadero. Las denominadas zonas vulnerables son aquellos territorios cuyas aguas subterráneas superan una concentración de 50 mg/l en nitratos (límite establecido para definir las zonas vulnerables) y cuyas aguas superficiales se encuentran en eutrofización o superan los 50 mg/l de nitratos, como acontece en la mayor parte de los territorios españoles.

Frente a los sistemas biológicos, los procesos de oxidación avanzada (POA's) muestran mayor eficacia en tiempos de reacción, sin embargo resultan, hoy en día mucho mas caros que los convencionales.

La cavitación forma parte de la sonoquímica y constituye uno de los campos mas modernos y prometedores de la química. La sonoquímica consiste en el aprovechamiento de los fenómenos químicos que tienen lugar en el interior de las burbujas que crecen y colapsan por efecto de ondas de ultrasonido. Este fenómeno físico es conocido como cavitación. En la última década varios laboratorios estadounidenses, europeos y japoneses han comprobado la sorprendente eficacia de esta tecnología en la eliminación de un amplio rango de contaminantes en efluentes líquidos. Para hacerse una idea de la extremada virulencia de los procesos ocurridos en las burbujas de cavitación, ésta puede llegar a dar lugar a fenómenos de fusión.

Partiendo de la demostrada eficacia de esta técnica se han planteado fuentes alternativas de generación de cavitación con costes más reducidos de lo que representa el ultrasonido. Se trata de la *cavitación hidrodinámica*. Esta técnica, basada en las ondas de presión generadas en un líquido mediante variaciones de velocidad en un conducto cerrado, ha dado lugar a resultados previos muy esperanzadores. Los mecanismos químicos del proceso lo convierten en un proceso de oxidación avanzada, sin embargo los costes estimados de operación resultan significativamente menores que los de la mayoría de POA's, siendo solo comparables a los del proceso Fenton y, eventualmente a los de la fotocatálisis solar antes mencionada.

6.3.1. Noción de cavitación

Cuando un líquido en movimiento roza una superficie se produce una caída de presión local, y puede ocurrir que se alcance la presión de vaporización del líquido, a la temperatura que se encuentra dicho líquido. En ese instante se forman burbujas de vapor. Las burbujas formadas viajan a zonas de mayor presión e implotan. Este fenómeno recibe el nombre de cavitación.

La implosión causa ondas de presión que viajan en el líquido y las mismas pueden disiparse en la

corriente del líquido o pueden chocar con una superficie.

La cavitación acústica es un fenómeno bien conocido. Cuando una onda sonora se propaga a través de un líquido, sus moléculas se ven sujetas a presiones positivas y negativas. Durante la fase de presión negativa, las pequeñas burbujas del líquido pueden crecer de forma impresionante (hasta 1.000 veces), dado que la presión es inferior a la presión del vapor. Cuando la fase de presión positiva pasa, la burbuja colapsa y la energía acumulada en ella durante el crecimiento es liberada. Es este fenómeno el que tiene aplicación en el tratamiento de residuos.

Las temperaturas alcanzadas pueden ser de hasta 10.000 grados Kelvin, suficiente para producir reacciones químicas. Si la densidad de energía es lo bastante alta en la burbuja que colapsa, los gases residuales se calientan hasta la incandescencia, emitiendo luz. Para que se produzcan reacciones nucleares, sin embargo, la energía debe incrementarse en un factor de un millón sobre las energías de sonoluminiscencia típicas. Una forma de lograrlo es incrementar el cambio de volumen durante la fase de crecimiento de la burbuja.

La absorción de la energía del ultrasonido, provoca un efecto térmico y el fenómeno de la cavitación, que se caracteriza por el aumento de la presión y la temperatura de las burbujas o cavidades con gas y líquido, debido a la resonancia, con alteración de la tensión superficial. Según sea dicha resonancia, se habla de:

- cavitación transitoria, o de
- cavitación estable.

El ultrasonido tiene una variedad de efectos que son el resultado de eventos mecánicos producidos, incluyendo la cavitación y el desgarro acústico.

El ultrasonido pulsante, usando ultrasonidos en intensidades y ciclos de trabajo que no producen aumentos mesurables en temperatura y son por lo tanto considerados como efectos no térmicos, parece que tiene aplicaciones con brillante futuro. Ellos han sido atribuidos a la cavitación y al desgarro acústico.

6.4. VITRIFICACIÓN

La técnica de la vitrificación consiste en el confinamiento de óxidos metálicos en el interior de una matriz vítrea cuya cantidad no debe ser fija, como acontece en un cristal. Así, muchos minerales naturales, como ferritas, cromitas, espinelas, etc., contienen en su estructura cristalina una cierta cantidad de elementos metálicos (metales pesados).

El proceso, de forma resumida, consiste en mezclar un formador de vidrio, un modificador de retículo y un estabilizador de red. Como formador de vidrio, el cuarzo es el compuesto más habitual, aunque también puede emplearse boro o fósforo; el modificador del retículo está formado por el flujo fundente, básicamente óxidos alcalinos y alcalinotérreos, a los que pueden añadirse los metales pesados que se desea inertizar; los estabilizadores de red actúan dando estabilidad a la estructura amorfa, y suelen ser óxidos de especies trivalentes.

Como ilustran las Figuras 3.15 y 3.16, el conjunto de materiales se introduce en un horno que se calienta hasta llegar a la fusión total. Una vez el líquido ha adquirido una viscosidad baja, se vierte sobre el agua. El enfriamiento brusco colapsa la estructura vítrea y la convierte en un sólido inerte.

Se entiende que existen una serie de relaciones y reglas para la formulación de un correcto vitrificado, de donde se colige que la cantidad de metales a tratar no puede ser cualquiera ya que podría producirse una

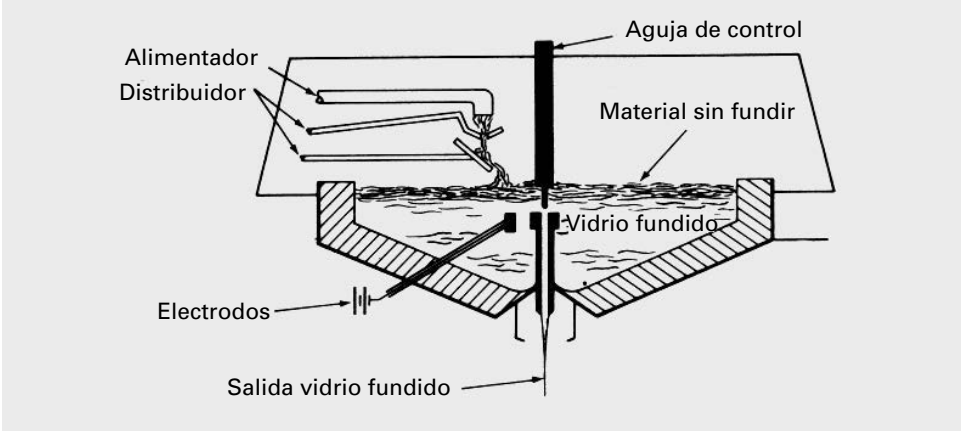


Figura 3.15. Esquema de un horno de fusión eléctrico.

separación de fases y lixiviar. Una variante de este sistema es el vitrificado *in situ*: esta técnica se aplica a los suelos contaminados; consiste en introducir unos electrodos a través de los que se suministra una gran cantidad de energía que posibilita la fusión de todo el volumen ocupado por los contaminantes, transformándolo físicamente en una especie de vertedero vitrificado que, a veces, puede tardar incluso algunos años en enfriarse.

Desde el punto de vista de la inertización, el proceso de vitrificación consiste en la fabricación de un vidrio lo más resistente posible a la lixiviación, por cuanto su objetivo es eliminar el peligro potencial de un metal pesado liberado al medio. En líneas generales, los siguientes factores mejoran la calidad de los vitrificados:

- *Complejidad.* La adición de un flujo de óxidos modificadores del retículo compuesto por una gran variedad de metales mejora la estructura del vidrio. Por desgracia, en el ámbito de los residuos la variedad está asegurada.
- *Temperatura.* Cuanto más elevada sea la temperatura de fusión del vitrificado más fuertes serán los enlaces y, por tanto, más resistente será el vitrificado.

Últimamente se han desarrollado una cantidad de sistemas de vitrificación de residuos a partir de antorchas de plasma o de hornos de arco. Estos sistemas se caracterizan por generar unas altísimas temperaturas, del orden de miles de grados, lo que, en ocasiones, provoca un efecto contrario al deseado por cuanto antes de que los metales, o sus óxidos, se combinen con el fundido y se integren en la matriz vítrea, la elevada temperatura los ha evaporado.

6.4.1. La vitrificación como herramienta de valorización de residuos

El proceso de vitrificación por fusión de residuos peligrosos ofrece la posibilidad de convertir a los residuos inorgánicos en productos inertes próximos a las escorias vitrificadas. La cantidad de residuos susceptibles de ser tratados por esta tecnología es muy elevada. La Figura 3.16 muestra a la izquierda la gama, no exhaustiva, de residuos y, a la derecha las aplicaciones del material vitrificado. En un capítulo posterior se detallan estos procesos.

Por ello, la vitrificación de residuos se realiza en hornos de crisol o de balsa donde se vierten los residuos cuando el baño se halla a la temperatura de fusión. Así, además de garantizar la destrucción térmica del posible componente orgánico presente, se minimiza la posibilidad de vaporización de ciertos metales y óxidos. En cualquier caso la vitrificación es la tecnología universalmente reconocida como la más segura para la inertización de residuos peligrosos.

La Figura 3.17 muestra el proceso de fabricación de fibra a partir de un líquido. Este cae dentro una corriente de aire que estira las microgotas de líquido transformándolas en microfibras, que más tarde pueden tejerse y convertirse en mantas.

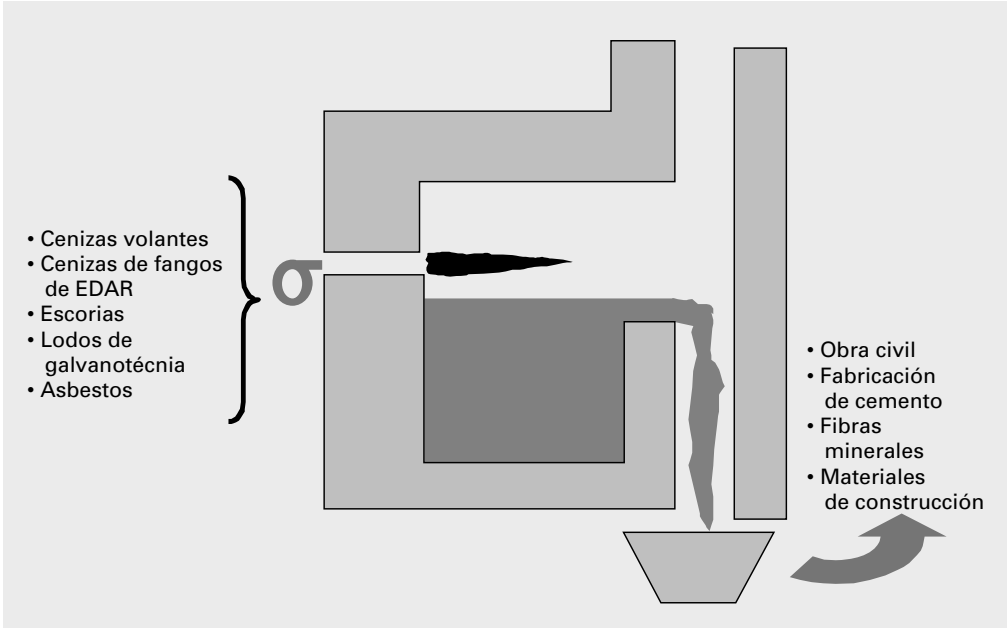


Figura 3.16. Esquema de un proceso de vitrificación, mostrando los *inputs* y *outputs* y las posibilidades de valorización.

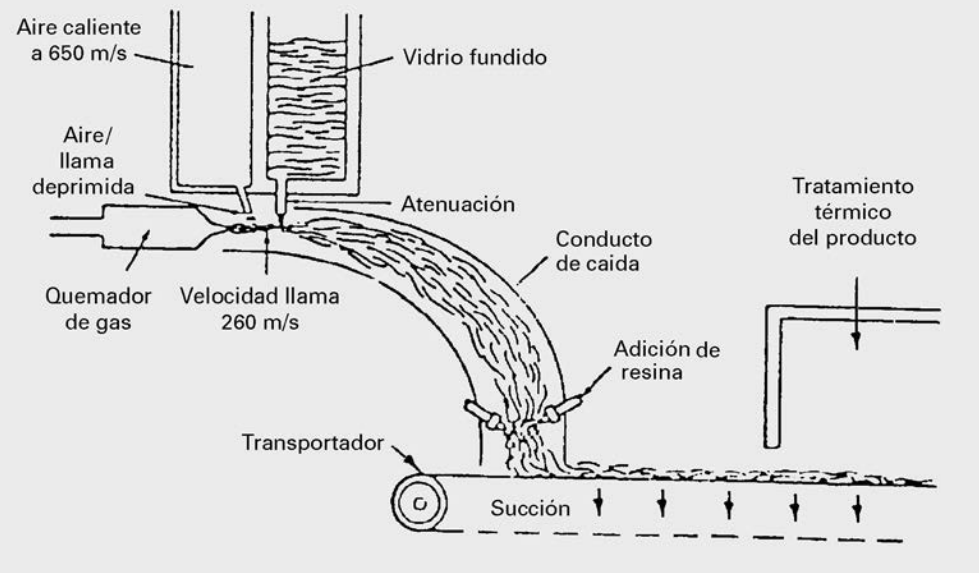


Figura 3.17. El proceso de fibrado de vidrio fundido.

6.4.2. La vitrificación como tecnología industrial

La Figura 3.18 muestra el esquema de un horno de fusión para la producción de vitrificados. Los hornos suelen ser de crisol calentados eléctricamente, lo que reduce la emisión de gases; también pueden estar alimentados por combustibles convencionales. El material a vitrificar entra por la parte superior, cayendo sobre la superficie del líquido fundido. La colada se produce en la parte inferior, rompiéndose en partes pequeñas al entrar en contacto con el agua.

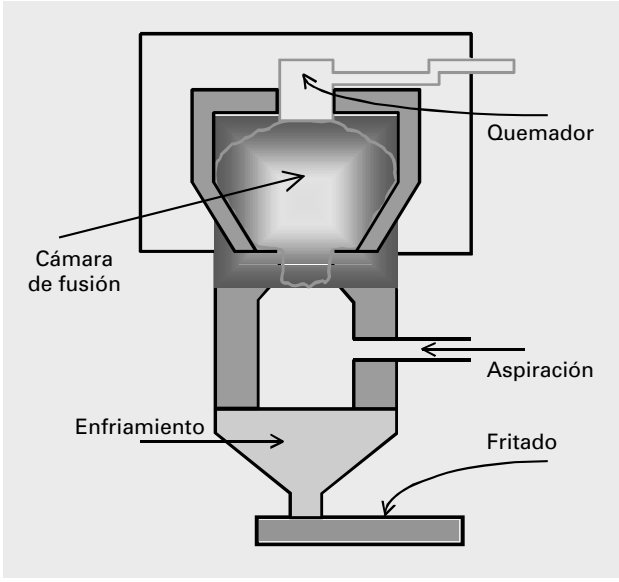


Figura 3.18. Esquema de un horno de vitrificación eléctrico.

El choque térmico producido en la caída del vidrio fundido sobre agua fría supone una rotura del material solidificado, en forma granulada, de manera que se puede manipular inmediatamente. El material obtenido se conoce como *frita*, pudiendo entenderse como un vidrio sobreenfriado inerte, siempre que la composición sea correcta.

Esta tecnología es imprescindible para incluir en la formulación de los esmaltes cerámicos las materias con tendencia a volatilizar o solubilizar en agua; en la decoración de objetos cerámicos los metales pesados (Cd, Se, Co, Cu, etc.) proporcionan el color. La mayor parte de las sales alcalinas son solubles en agua; si se prepara un esmalte con alguno de estos productos se evaporará la sal al evaporarse el agua.

Un esmalte suele ser la combinación de una frita y de materias primas sin fundir; esta combinación facilita la fusión de la mezcla, ya que una parte de ella ya es un vidrio. Los procesos de cocción de azulejos y otros materiales cerámicos han avanzado considerablemente, pasando de ciclos de 12-20 horas de frío a frío a ciclos entre 20 y 40 minutos, lo que ha provocado que las prestaciones de los esmaltes se hayan adaptado a estas particularidades. El control de calidad es mejor, ya que así se garantiza una fórmula química precisa. Durante la fabricación se analizan y corrigen las composiciones, mientras que las materias primas están sujetas a variaciones que muchas veces condicionan el comportamiento de los vitrificados.

Desde el punto de vista mineralógico, a causa del modo de obtención y del enfriamiento instantáneo, la estructura de la frita es completamente vítrea, mien-

tras que la de un esmalte es vítrea con una proporción variable de material recristalizado. A diferencia de la mayoría de los procesos de tratamiento de residuos estudiados, el material pierde la geometría original al fundir completamente.

6.5. ESTABILIZACIÓN Y SOLIDIFICACIÓN

La estabilización de residuos es una técnica cuyo objetivo es obtener la fijación química de los contaminantes que puedan contener dichos residuos. Por ejemplo, durante el tratamiento de los fangos resultantes de la depuración de las aguas residuales urbanas, se añade cal para la destrucción o ralentización de los procesos de fermentación.

Por otra parte, la solidificación consiste en un conjunto de técnicas que permiten mejorar el manejo y características físicas del residuo. En la mayoría de países no se permite la entrada en el vertedero de residuos con un contenido de humedad superior al 65%. Incluso por debajo de este umbral hay materiales que tienen consistencia líquida y es preciso *solidificarlos* para su posterior manejo. Así, la técnica más corriente es la mezcla del residuo con cemento.

La USEPA ha definido estos conceptos de la siguiente forma:

- *Estabilización:* es el conjunto de técnicas destinadas a reducir el potencial de peligrosidad de un residuo, transformando el contaminante en su forma menos soluble, tóxica o móvil. La naturaleza física del residuo y sus características de manejo no tienen por qué ser alteradas mediante esta técnica. Hoy en día se suelen usar como sinónimos los términos fijación y estabilización.
- *Solidificación:* es el conjunto de técnicas que encapsulan el residuo sólido en una forma monolítica de alta rigidez estructural. La encapsulación se puede desarrollar en forma de pequeñas partículas de residuo, conocida como microencapsulación, o bien en forma de bloques de tamaño apreciable, o macroencapsulación. La solidificación no involucra necesariamente una interacción química entre el residuo y el agente solidificante, pero retiene mecánicamente al residuo dentro del sólido obtenido. La migración del contaminante es restringida o bien disminuyendo la superficie expuesta a la lixiviación, o bien aislando el residuo con una cápsula impermeable.

La definición del término monolítico presenta ciertos problemas de identificación, ya que suele interpretarse en su forma literal como *bloque de piedra* y no como *sólido parecido al terreno*, que es la forma o aspecto físico en que se obtiene en muchos procesos de este tipo.

La Figura 3.19 representa la esquematización de la forma en que suelen llevarse a cabo los procesos de estabilización y solidificación.

En general estas dos tecnologías consisten en el empleo de sustancias floculantes para conseguir la sedimentación en métodos de concentración, prensado, etc. Existen muchísimas técnicas de solidifica-

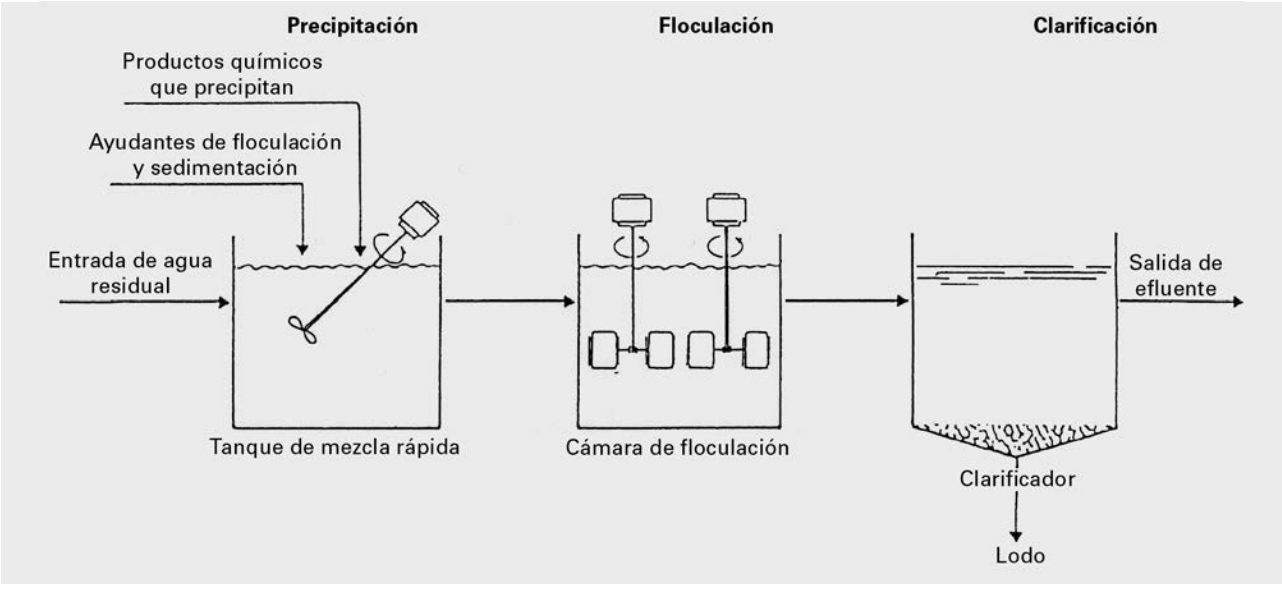


Figura 3.19. Esquema de un proceso de solidificación y estabilización.

Tabla 3.6. Compatibilidad de algunas de las técnicas de solidificación en función de diversos tipos de residuos

Sustancia	Técnica basada en cemento	Técnica basada en la cal	Técnica basada en termoplásticos	Técnica basada en polímeros
Disolventes Aceites	Posible evaporación	Posible evaporación	Posible evaporación	Retardo de polimerización
Resinas Plásticos	Incrementa resistencia	Incrementa resistencia	Acción ligante	Retardo de polimerización
Ácidos	Neutralización de la acidez	Compatible	Puede ser neutralizado después de tratamiento	Compatible
Oxidantes	Compatible	Compatible	Posible destrucción	Posible destrucción
Sulfatos	Posible disgregación de retardantes	Compatible	Craquing	Compatible
Metales pesados	Compatible	Compatible	Compatible	Posible solubilización. Controlar pH
Radiactivos	Compatible	Compatible	Compatible	Compatible

ción de residuos, pero las más usuales son las dos que se detallan a continuación:

- *Técnicas basadas en el cemento*: el residuo se mezcla con cemento portland y/o cenizas volantes procedentes de centrales termoeléctricas de carbón. Algunas arcillas, sales o metales alteran el fraguado y pueden perjudicar sensiblemente el proceso de inertización.
- *Técnicas basadas en la cal*: los residuos se mezclan con cal (óxido, o más frecuentemente hidróxido de cal) y, a veces, con sustancias con base sílice. Con el tiempo, y debido a la presencia de CO_2 atmosférico, la cal se carbonata y queda rigidizada. Algunas sustancias orgánicas pueden alterar la solidificación.

Estos dos sistemas, o bien una mezcla de ambos, son los que regularmente se usan en las llamadas plantas de tratamiento fisicoquímico para la estabilización y solidificación de los residuos antes de su vertido. Pero existen otras igualmente válidas:

- *Técnicas basadas en mezclas bituminosas (termoplásticos)*: los residuos se mezclan con productos asfálticos. El tratamiento debe hacerse a temperaturas superiores a 100 ℃, lo cual puede provocar la emisión de algún residuo gaseoso o en forma de vapor. La mayoría de los disolventes alteran el proceso.
- *Técnicas de polimerización*: consiste en mezclar el residuo a tratar con una resina o agente polimerizador para proporcionar cierta rigidez al conjunto. El más frecuente es la ureaformaldehido. La masa resultante sólida es esponjosa en la textura. Estos polímeros orgánicos pueden aceptar residuos de un amplio margen de pH. No existen problemas de combustión. Sólo se requieren cantidades pequeñas y el producto final ocupa un 30% de volumen menos que en el caso de los sistemas basados en el cemento. Las limitaciones de este método incluyen la alta viscosidad del material (que crea problemas de mezclado y manejo), la posible generación de gases tóxicos durante la licuación, la biodegradación potencial debida al ambiente si no se envasa en contenedores adecuados, la corta vida para la resina y la generación de lixiviados si toda el agua no es controlada. Además, su coste es unas cinco veces superior a los sistemas basados en cemento y cal.
- *Técnicas de encapsulación*: El sistema más usado es la mezcla del residuo con polibutadieno seguido de una fina capa de polietileno.

La Tabla 3.6 muestra la compatibilidad de varias de las técnicas de solidificación expuestas con algunas familias de residuos.

6.5.1. Planta de tratamiento fisicoquímico

Son plantas cuya finalidad consiste en el tratamiento de los residuos para poder depositarlos en un vertedero. Muchos vertederos (o legislaciones) no admiten residuos líquidos o pastosos y es preciso someterlos a un proceso previo antes de su depósito en el vertedero.

Normalmente estas plantas, tratan los siguientes tipos de residuos:

- Baños ácidos.
- Baños básicos.
- Sales metálicas.
- Emulsiones.

La industria dispone de diversas tecnologías para tratar los diferentes residuos. Aparte del área de recepción y laboratorio, estas plantas disponen de las siguientes áreas:

- Área de descarga y almacenamiento según la naturaleza del residuo.
- Foso de descarga de fangos y/o lodos.
- Área de tratamiento y neutralización.
- Área de deshidratación de lodos y afluentes.
- Área de preparación de reactivos.

En este tipo de plantas se esmera mucho el diseño de manera que muchos de los residuos entrantes sirvan de reactivos para la neutralización de otros residuos, de esta manera se minimiza el consumo de materias primas.

El punto 8 del DVD adjunto pueden verse diversos procesos que tienen lugar en las plantas de tratamiento fisicoquímico de residuos.

6.6. COMPARACIÓN ENTRE TRATAMIENTOS FISICOQUÍMICOS

El proceso de incineración, o de gasificación, de RSU o de fangos de EDAR deja necesariamente un residuo secundario que, a su vez es preciso tratar. El objeto de este apartado es incorporar puntos de discusión y de criterio para discernir entre las tecnologías correctas o aquellas aplicaciones que van a ser manifiestamente incorrectas. Para abordar el desarrollo de esta comparación se da por descontado que el proceso de tratamiento de los fangos (otro tanto podría decirse de las cenizas de incineración de los RSU, de las que se habla más extensamente en los capítulos 11 y 12 de esta obra) será:

- *Conversión energética.* Ya sea por incineración o por gasificación. Es decir un proceso térmico que permita la extracción de la fracción orgánica del fango para convertirla en energía. El proceso, inevitablemente dejara un residuo secundario, la ceniza.
- *Tratamiento de la ceniza.* Naturaleza y tratamiento más adecuado.

Durante la conversión energética se supone que se ha destruido toda la materia orgánica, o sea que en principio no debería tenerse en cuenta ya que la ceniza esta exenta de materia orgánica. Esta aseveración no es absolutamente cierta puesto que en preceptivo tratamiento de gases existe la reformación de ciertos organoclorados que deben abatirse, adsorberse, con carbón activo (también materia orgánica).

Los compuestos contaminantes que puede contener un fango son:

- *Elementos potencialmente tóxicos:* metales pesados: cadmio, cromo (tetra y hexavalente), cobre, mercurio, níquel, plomo y zinc. Procedentes de los productos químicos del hogar.
- *Contaminantes orgánicos:* hidrocarburos poliaromáticos, PCB, ftalatos, derivados del benceno, dioxinas y furanos. Algunos de estos compuestos son fácilmente degradables en el proceso de depuración de las aguas, mientras que otros son persistentes y llegan a formar parte del fango.

En resumen, la ceniza que solo debería estar compuesta de materia inorgánica y las sales resultantes del proceso de neutralización, también tienen una fracción si bien muy reducida de materia orgánica que deberá tenerse muy en cuenta a la hora de elegir un sistema de tratamiento final.

6.6.1. Cenizas de tratamiento térmico de diversos residuos

Cuando se realiza el tratamiento térmico, básicamente de incineración, de una infinidad de residuos, a pesar de que algunos de ellos no tienen esta calificación, como los indicados en la Tabla 3.7, se liberan una serie de elementos potencialmente peligrosos.

Tabla 3.7. Principales contaminantes en cenizas de diversos residuos

Residuo	Cl	Cd	Hg	Sb	As	Pb	Cr	Cu	Mn	Ni	Sn	Zn
ASR	20.000	30	0,9	80	9	900	200	10.000	400	150	3.000	4.000
Fango de EDAR	1.000	5	1,1	—	0,2	100	100	500	—	70	—	1.000
Plásticos	10.000	40	1	50	0,8	300	50	90	20	10	25	600
Carbón	2.000	0,5	0,7	3	9	60	20	30	80	30	5	90
Cárnicos	3.000	0,4	0,3	4	0,9	1	3	9	20	0,9	4	200

Es obvio, como muestra la tabla, que la presencia de algunos contaminantes es muy importante.

Los elementos especificados en la tabla precedente (3.7), están expresados en mg/kg de residuo y se refieren a valores estándares. Algunos comentarios particulares son los siguientes:

- *ASR (Residuo de la fragmentación de vehículos).* Debido a la gran cantidad de metales presentes en este tipo de residuo, es normal que también sea la ceniza que presente mayor cantidad de metales en la ceniza resultante.
- *Fangos de EDAR.* Se trata de un valor medio de los diversos tipos de fangos y de tratamientos.
- *Plásticos.* Se trata de residuos mezclados, la cantidad de PVC presente explica la cuantía de Cl tan elevada.
- *Carbón.* Los carbones, como todos los minerales y materias primas, contienen una gran cantidad de contaminantes.
- *Carnes y residuos con huesos.* Por la cantidad de metales no es un residuo especialmente conflictivo desde el punto de vista de la conversión energética.

Como comentario y a título de epílogo debería decirse que en el caso de la incineración, la ley obliga a hacer un tratamiento de gases. En cambio en la incineración del carbón (una central termoeléctrica de carbón, técnicamente es igual a otra de RSU) o en una fábrica de cemento, no es obligatorio el tratamiento de gases, con el agravante de que las cantidades de gases producidas en una termoeléctrica son infinitamente mayores que en una incineradora de RSU.

Los componentes de los residuos secundarios, que en la Tabla 3.7 se agrupan bajo la denominación de materia inorgánica, pasarán a llamarse cenizas a la salida de la instalación de conversión energética, ya que están formadas, a su vez por:

- Materia inorgánica directamente procedente del propio residuo, en este grupo se incluyen los metales. Hay que tener presente que algunos de los componentes iniciales, como los carbonatos, se descompondrán en el proceso y pueden dar lugar a otro tipo de compuesto o simplemente permanecer como óxidos con un nivel de reactividad mayor.
- *Sales.* La inmensa mayor parte de las sales pueden clasificarse de productos secundarios, no estaban en el residuo original, y se han formado gracias a la acción de los reactivos añadidos para neutralizar los gases ácidos.
- *Reactivos.* Buena parte de los reactivos que se añaden al proceso quedan sin reaccionar. Ello es debido a que la baja cinética de estos procesos obliga a adicionarlos en exceso.
- *Material particulado.* De difícil catalogación ya que si bien una parte procede de la propia estructura inorgánica del residuo, otra es fruto de la abrasión y del árido que compone el lecho fluidizado.
- *Compuestos orgánicos.* Los hidrocarburos de cadena larga son compuestos muy estables y si bien en la cámara de postcombustión se destruyen, en la etapa de enfriamiento, en la caldera, el tiempo es suficientemente largo como para dar lugar a la reformación de organoclorados que deberán abatirse con la inyección de carbón activo.

La somera descripción de la naturaleza de las cenizas ya da una pauta de la complejidad que va a entrañar el tratamiento de las mismas. Es por ello que se juzga necesario ampliar un poco alguno de los contaminantes señalados.

6.6.2. Problemática de los metales en los residuos secundarios

Los metales, especialmente los pesados, están casi omnipresentes en los fangos de EDAR (por elegir de los residuos enumerados en la Tabla 3.7), en particular en las depuradoras en las que también vierten las aguas industriales. Por lo general, los metales se hallan en tres formas:

- En la fracción precipitada, formando sales, por orden de importancia: cloruros, sulfatos, hidróxidos, fosfatos, carbonatos, etc.
- En la fracción disuelta. Cuando el agua se evapora las sales quedan en la parte seca del fango.
- Fracción asociada al complejo orgánico.

Los metales analizados son aquellos que de alguna manera interfieren en la etapa de depuración y en consecuencia en los fangos. Se pueden clasificar en:

- Metales considerados como indeseables: Al, Fe, Mn, Sn, Ba y Cr^{+3}.
- Metales considerados como tóxicos: As, Cd, Cu, Cr^{+6}, Ni, Hg, Pb, Se, Co y Zn.

Cuando se lleva a cabo un tratamiento térmico de alta temperatura en los fangos, o con los RSU, los

metales se comportarán de forma diferente. Los metales, atendiendo a su volatilidad, pueden clasificarse en:

- Metales que ellos mismos o sus compuestos, no son volátiles: Ba, Be, Cr, Ni, V, Al, Ti, Ca, Fe, Mn, Cu y Ag.
- Metales que ellos o sus compuestos son semivolátiles: Sb, Cd, Pb, As, Se, Zn, K y Na.
- Metales que ellos y sus compuestos son volátiles: Hg y Tl.

6.6.3. Distintos métodos de tratamiento de los residuos secundarios (cenizas) procedente de tratamientos térmicos

En los siguientes capítulos de esta obra se describen las ventajas e inconvenientes, desde el punto de vista ambiental, de los diversos sistemas de tratamiento que pueden aplicarse a las cenizas (residuos secundarios) procedentes de los tratamientos térmicos:

- Depósito en vertedero.
- Tratamiento fisicoquímico.
- Valorización en cementera.
- Valorización cerámica.
- Valorización por vitrificación.

6.6.3.1. El vertido

El vertido directo de cenizas de fango de EDAR no es posible, como tampoco lo es el de las cenizas volantes de las incineradoras de RSU debido a su caracterización tanto química como física. Si, momentáneamente alguna Comunidad Autónoma permitiera el vertido lo debería hacer exigiendo un pretratamiento. No obstante, en poco tiempo lo restringiría drásticamente por una serie de motivos:

- Los costes de vertido se incrementan año tras año, aunque todavía se hallan a mucha distancia de los precios que pagan países de nuestro entorno. El aumento de costes obedece tanto a limitaciones de espacio (es el caso de Cataluña o centro Europa) como a la paulatina adecuación de los vertederos a las normas vigentes.
- Los costes derivados de los pretratamientos que en un futuro será necesario llevar a cabo en los fangos antes de su vertido.

A título de ejemplo y comparación, los fangos de EDAR secos se pueden verter en algunos países de la UE. Así, en nuestro país vecino, Francia, el coste de vertido rondaba los 100 €/t en 2005, sin contar el transporte. Las administraciones responsables deberían tomar nota para obrar en consecuencia. En otros países, como Suiza, hace años que se ha prohibido el vertido de fangos, en Austria lo han prohibido recientemente y en los Países Bajos lo harán próximamente.

Como conclusión debe extraerse que, si bien los fangos secos pueden ser depositados hoy en día en vertederos, las cenizas resultantes de su tratamiento térmico no es posible verterlas sin pretratamiento.

6.6.3.2. Los tratamientos fisicoquímicos

Este conjunto de tratamientos también denominados de E/S (estabilización/solidificación) y se consideran, para el caso presente, como un paso previo para el depósito en vertedero.

La estabilización consiste en la fijación química de los contaminantes que pueda contener un residuo. Por ejemplo, durante el proceso de tratamiento de de aguas residuales urbanas en algunas EDAR's se añade cal para la destrucción o relentización de los procesos de fermentación.

La solidificación es un conjunto de diversas técnicas que permiten mejorar el manejo y características físicas del residuo. En la mayoría de países no se permite la entrada en el vertedero de residuos con una humedad superior al 65%. Incluso por debajo de este umbral hay materiales que tienen consistencia líquida y es preciso «solidificarlos» para su manejo. Así la técnica más corriente es la mezcla del residuo con cemento.

El modo de tratamiento de estabilización/solidificación más común se consigue a base de mezclar el residuo con cemento Portland. Si bien en el caso de llevar a cabo este proceso con fangos de EDAR sería recomendable usar cemento aluminoso. El compuesto principal del cemento Portland es el silicato cálcico hidratado y su morfología depende de la relación Si/Ca y de la cantidad de agua presente. Para estas aplicaciones la presencia de agua en juego es crítica.

Las reacciones de hidratación (fraguado) son exotérmicas y generan una temperatura de 30-40 ℃. Por tanto habrá que prestar atención a los compuestos orgánicos volátiles presentes en los residuos. La USEPA reglamenta y restringe la inertización por esta tecnología para los residuos que contengan compuestos orgánicos volátiles o semivolátiles.

Sin embargo el principal problema de esta tecnología son los efectos negativos que producen los nu-

merosos compuestos presentes en los residuos durante las reacciones de hidratación y fraguado. De hecho existe un conjunto de reacciones, además de las citadas, como son las reacciones de hidrólisis, procesos de oxidación, procesos de reducción y formación de nuevos compuestos. El problema principal radica en que la composición del residuo puede cambiar de repente con unas consecuencias imprevisibles.

Tradicionalmente la cal ha sido usada, en el campo del tratamiento de residuos, para neutralizar las aguas residuales ácidas y precipitar los metales antes de la descarga. Últimamente se está usando en los procesos de E/S para residuos con aceites y alquitranes así como otros residuos orgánicos.

La elevada superficie especifica (por esto es necesario una gran finura) de la cal le confiere un gran poder de adsorción de muchos productos orgánicos. La acción más importante buscada en el proceso es la carbonización que hace las veces de una matriz que atrapa los compuestos.

La técnica mas novedosa es la denominada «cal modificada». Este proceso se ha desarrollado en particular para estabilizar y tratar residuos orgánicos. Al igual que con el cemento Portland, se trata de un proceso muy exotérmico y el calor generado propicia la volatilización de COV's.

Existe una variante del sistema que consiste en añadir cal viva (CaO) y agua. La reacción es muy exotérmica y el calor generado se emplea para evaporar agua. Por otra parte, el hidróxido formado (portlandita) reacciona con ciertos metales y precipita los correspondientes hidróxidos. El resto del hidróxido «cementa» la masa y todo junto debe llevarse al vertedero.

Otros aditivos usados son los que se basan en puzolanas (cenizas volantes de centrales termoeléctricas y silicatos) y arcillas. Dentro de los silicatos el aditivo más empleado es la sílice amorfa (micro sílice o «*silica fume*»), su estructura amorfa hace que presente una gran superficie especifica, del orden de 25 m^2/g y por lo tanto se convierte en un reactivo muy adecuado, tanto para el cemento como para la cal. En el caso de los metales su acción consiste en mejorar la inmovilización.

En conclusión debe entenderse que los procesos de E/S aplicados al tratamiento de las cenizas lo son en cuanto a tratamientos previos al vertido puesto que la inmovilización de los compuestos peligrosos no está en absoluto asegurada.

Al igual que las cenizas volantes procedentes de la incineración de RSU, deberían ser tratadas con cemento aluminoso, encerradas en big-bags de plástico bien selladas y transportadas a un depósito de seguridad.

6.6.3.3. Empleo de cenizas como materia prima para prefabricados de hormigón

El proceso trata de formular un hormigón para fabricar prefabricados usando como materia prima la ceniza resultante de los procesos térmicos de los fangos de EDAR.

Para valorar las cualidades del proceso es preciso analizar los factores que afectan de manera directa a la fijación y prevención de la lixiviación de los contaminantes que se hallan en relación directa con:

- La gran superficie específica de la base C-S-H que permite la absorción y la adsorción de iones.
- La elevada alcalinidad que permite la precipitación de los hidróxidos insolubles.
- La posibilidad de incorporar sustancias en el retículo cristalino de las fases de dos componentes.

De hecho el fenómeno de la interacción y/o reacciones que tienen lugar durante el fraguado son muy complejas y van desde la pura encapsulación a la reacción química, la adsorción, la quimisorción, absorción, etc.

La degradación es un fenómeno de destrucción paulatina de la estructura del hormigón que obedece a diversas causas o combinación de ellas como: difusión de agentes agresores a través de reacciones en estado sólido, cristalización de fases, reacciones químicas, adsorción de iones químicamente muy activos y lixiviación.

La portlandita es la fase más soluble de todas las formadas en el fraguado. Por ello cuando se prevea una determinada condición de trabajo en la que sea fácil el contacto con líquidos agresivos, será preciso limitar la cantidad de esta fase.

La fuerte alcalinidad de los hormigones los hace especialmente resistentes a la agresión de los organismos vivos, ya que la actividad biológica es incompatible con pH muy altos (la cal se usa, a veces, para estabilizar los fangos de depuradora), o muy bajos.

En conclusión a los tratamientos de E/S de las cenizas a base de prefabricados, el cromo hexavalente (VI) presente en los cementos comerciales es

el causante de efectos nocivos en las personas que los manipulan, alergias en contacto con la piel, dermatitis, irritaciones del aparato respiratorio, bronquitis, sinusitis, etc. si es inhalado. Pero también lo es para el medio ambiente. El Cr (VI) es una especie tóxica y está considerada como cancerígeno potencial por la Organización Mundial de la Salud. Se sabe que la cantidad de cromo en el cemento, así como su valencia y solubilidad son decisivas para que se produzca la sensibilización de la piel. El cromo trivalente, Cr (III), aunque más nocivo que el hexavalente, produce menos problemas de dermatitis debido a su escasa solubilidad y capacidad de penetración en la piel.

Para regular la cantidad de Cr (VI) permitida, la UE ha dictado la Directiva 2003/53/CE, en la cual se prohíbe el uso y comercialización de cementos cuyo contenido en Cr (VI), una vez hidratado, sea superior a 2 ppm sobre el peso de cemento en seco, ya que a este metal se lo considera sustancia carcinogénica, mutagénica y sensibilizante.

El cemento contiene cantidades de cromo variables no solo procedentes de las materias primas empleadas sino también del desgaste de los refractarios del horno, normalmente de cromo/magnesita, y de la abrasión que sufren las barras de acero que se emplean para la trituración del clínquer, procedente de algunas incorporaciones de residuos, como escorias de alto horno, y del yeso que se adiciona para formular el cemento. Por lo general todo el cromo aportado es trivalente, lo que sucede es que durante la cocción, a elevada temperatura y en presencia de aire se oxida a Cr (VI).

Es obvio que el empleo de cenizas de fango de EDAR solo contribuirá a aumentar el problema del cromo. Por otra parte, el medio acuoso en que se obtienen los prefabricados contribuye a la lixiviación de las sales solubles presentes en las cenizas.

Finalmente la presencia de materia orgánica, aunque sea en pequeñas cantidades pero con un tamaño de partícula muy pequeño, puede contribuir a crear complicaciones en el fraguado.

6.6.3.4. Valoración en cementera

Las reacciones que tienen lugar en el interior de un horno de clínquer son de naturaleza cerámica. En términos muy elementales se podría definir una cerámica como aquel material que se forma gracias a una serie de reacciones que desencadenan las fases amorfas, líquidas a alta temperatura, y unas pocas que tienen lugar en estado sólido. En un vidrio, la totalidad de las reacciones tienen lugar a partir de fases amorfas pero en el clínquer casi la totalidad de las reacciones se desarrollan en estado sólido y a partir de materiales cristalinos.

Las reacciones en estado sólido presentan una cinética muy lenta y ello ha de compensarse con un aumento de la temperatura. Así mientras una cerámica convencional se consigue a temperatura próxima a los 1.000 ℃, un horno de clínquer sobrepasa los 1.300 ℃.

En muchas especies cerámicas las fases cristalinas se mantienen unidas por la fase amorfa, así se podría considerar el vidrio como un cemento a alta temperatura; sin embargo, hay una amplia clase de cementos cuya mezcla puede modelarse a baja temperatura y donde el agua propiciaría el enlace produciéndose una nueva fase en toda la masa. Este es el campo de los cementos y yesos comunes. Por lo general es muy importante regular la cantidad de agua, cuyo exceso podría debilitar su estructura.

Las materias primas usadas para la fabricación del clínquer para el cemento Portland son la caliza, la arcilla y ligeras cantidades de correctores de formulación. Las materias primas se trituran finamente y se introducen en el horno de calcinación. A las temperaturas de trabajo, la caliza (CO_3Ca) se descompone. El óxido de cal resultante es bastante refractario, no reacciona, pero si puede ser fácilmente atacado por los productos resultantes de la descomposición de la arcilla. Así el SiO_2, procedente de la descomposición de los silicatos de los diversos minerales de arcilla, es activo y se combina con el CaO. A la vez los restos de la destrucción de la arcilla van formando diversos compuestos, cristalinos, con el CaO presente. El material sintetizado se denomina clínquer y mineralógicamente está constituido por silicatos y aluminatos de fórmulas complejas, entre los que cabe destacar:

- Silicato tricálcico: SiO_2. $(CaO)_3$.
- Silicato bicálcico: SiO_2. $(CaO)_2$.
- Aluminato tricálcico: Al_2O_3. $(CaO)_3$.
- Aluminato-Ferrito-tetracálcico: Al_2O_3. Fe_2O_3. $(CaO)_4$.

Al clínquer así obtenido se le añade una cantidad de yeso (puede ser yeso FGD residual), y con frecuencia cenizas volantes de centrales termoeléctricas (otro residuo), y al material fabricado se le llama cemento Portland. De manera similar se fabrica el cemento aluminoso.

A diferencia de la cerámica y el vidrio que salen de fábrica como materiales terminados, el cemento es la materia prima para la fabricación de los hormigones y morteros. Para que ello se produzca debe intervenir el fenómeno del fraguado o del endurecimiento de la mezcla cemento-áridos-agua.

El fraguado estriba en una serie de reacciones complejas de hidratación que tienen lugar entre los componentes del cemento por la acción del agua. Los principales compuestos del material fraguado son la portlandita ($Ca(OH)_2$) y el complejo C-S-H, con cantidades, aproximadas, del 20% y 65% siendo el resto otras fases**.**

Es obvio que existen ciertas limitaciones en el empleo que vienen supeditadas a que ciertos contaminantes no afecten a la calidad del clínquer ni a las instalaciones. Entre ellas cabe mencionar los siguientes casos:

- *Magnesio*, que puede provocar el hinchamiento de la magnesia del cemento en obra (límite: 2% sobre el peso de clínquer).
- *Azufre*, una parte se incorpora al clínquer pero la otra puede provocar la formación de costras en el propio horno (límite: 3,5% sobre el peso de clínquer).
- *Cromo*, por la normativa vigente.
- *Fósforo*, su presencia puede provocar el debilitamiento de la resistencia inicial del cemento en obra (límite: 0,5 de P_2O_5 sobre el peso de clínquer).
- *Cloro*, los cloruros generados forman anillos que pueden provocar el taponamiento del horno (el limite se establece en 200 mg/kg de clínquer).

Al margen de las limitaciones expuestas, hay que ser conscientes de otros dos parámetros fundamentales:

- A diferencia de los fangos de EDAR que contienen mayoritariamente materia orgánica (susceptible de transformarse en energía), las cenizas no aportan ningún valor energético.
- La mayor parte de los metales pesados presentes en las cenizas de fangos de EDAR serán emitidas a la atmósfera por la chimenea. Si bien las cantidades son pequeñas y la dilución en la enorme cantidad de gases supone que se cumplan los límites de emisión, desde el punto de vista ambiental, los metales serán emitidos a la atmósfera.

El único parámetro interesante y positivo a valorar en la incorporación de cenizas es la aportación de una notable cantidad de cal.

6.6.3.5. Valorizaciones cerámicas

A medida que aumenta la temperatura comienza la formación de la fase amorfa, como consecuencia del desmoronamiento de las estructuras cristalinas. Esta fase amorfa, que es líquida a elevada temperatura, es muy agresiva y conduce a un incremento de las reacciones. La fase líquida se va introduciendo en los intersticios de las micelas de arcilla y debido a la gran viscosidad, las va atrapando y englobando. Durante el proceso el aire, o gases procedentes de la conversión energética de la fracción orgánica contenida en las cenizas de los fangos de EDAR, quedan ocluidos dando lugar a poros.

La ceramización, cuando se ha llevado a cabo correctamente, establece la frontera con la encapsulación que es el objetivo de toda una serie de procesos alternativos a la ceramización y, por tanto, del futuro comportamiento de un residuo confinado en el seno de un medio receptor. En pocas palabras: si el residuo entra a formar parte íntima y química del nuevo compuesto, el futuro comportamiento del conjunto será homogéneo y correcto, pero si el residuo es solo retenido físicamente, sin cambio de estructura morfológica y/o química quedará encapsulado y su futura evolución dependerá más del medio donde se halle que de su propia estabilidad y resistencia. En el primer caso se hablará de ceramización (y verdadera inertización) mientras que en el segundo escenario se deberá hablar de encapsulación. La Figura 3.20 muestra la secuencia de la ceramización, donde se intenta mostrar como la fracción inorgánica del fango puede sinterizar e integrarse en la matriz cerámica.

Todas las reacciones en estado sólido, como las cerámicas, presentan, a pesar de la elevada temperatura, una cinética de reacción extremadamente lenta. El factor capaz de acelerar el proceso es el tamaño

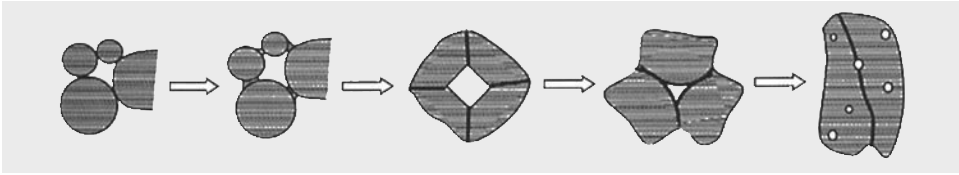


Figura 3.20. Principio de la ceramización.

de grano: Cuanto más fino sea el grano mayor superficie específica y mayor reaccionabilidad y ello es un parámetro que juega a favor de las cenizas de los fangos de EDAR. Por el contrario un grano de tamaño suficientemente grande queda sin reaccionar y, en el mejor de los casos, encapsulado.

Establecer la frontera donde el residuo se incorpora en la cerámica o queda encapsulado depende de otros factores, además de la distribución granulométrica, como, por ejemplo la reaccionabilidad de la arcilla y el propio residuo. Una frontera prudente correspondería a un tamaño de 500 mm (0,5 mm.). Por encima de este tamaño el residuo queda encapsulado y por debajo se integra en la matriz cerámica.

En síntesis, la cerámica abre una amplia gama de posibilidades para la valorización de los fangos. Sin embargo, como acontece con todas las técnicas aparentemente fáciles de aplicar, es preciso tener un conocimiento cerámico profundo así como de los posibles impactos ambientales que una mala gestión de esta tecnología podría ocasionar. Los más importantes son:

- El tamaño de grano usado en la cerámica. En la fabricación de ladrillos y tejas (cerámica roja o estructural) el estado de trituración de la arcilla es ligero y superficial, la gran mayoría de partículas sobrepasa el 0,5 mm, con lo que las cenizas, en el mejor de los casos quedarían encapsuladas. Esta vía de utilización quedaría descartada y debería explorarse su posible incorporación en las cerámicas de pavimento y revestimiento puesto que trabajan con una distribución granulométrica mucho mas fina.
- Las cenizas de fangos de EDAR contienen sales solubles. Este es un verdadero problema, como acontece con la fabricación del hormigón, ya que tanto la cerámica estructural que trabaja con un 20% de agua para la etapa de extrusión como la de pavimentos y revestimientos que llega a usar el 50% en la fase de molienda por vía húmeda, las sales alterarán los parámetros reológicos de la pasta cerámica.
- Emisiones. El factor clave para la contención de los metales en la matriz cerámica se basa en que la temperatura de formación de líquido (fase amorfa del mineral de arcilla) sea igual o inferior a la de volatilización de los óxidos metálicos presentes. Ello tiene que ver con la naturaleza de la arcilla empleada. Existen muchas arcillas de interés cerámico que se hallan totalmente contraindicadas.

6.6.3.6. Tratamiento y valorización por vitrificación

Desde la óptica ambiental la vitrificación debería considerarse el homónimo de la incineración para el tratamiento de residuos inorgánicos tóxicos y peligrosos, con la desventaja, desde el punto de vista energético de que la incineración es un proceso energéticamente excedentario, mientras que la vitrificación es demandante. No obstante ello no significa que el coste energético deba ser muy elevado. Este dependerá, básicamente, de la temperatura de fusión y del tipo de horno.

El vidrio puede definirse como un producto inorgánico fundido que se ha enfriado hasta un estado rígido. Ello permite la posibilidad de incorporar óxidos de metales altamente tóxicos a su red. Es decir, es posible formar vidrio, o incluir dentro de la matriz vítrea, la inmensa mayoría de los elementos de la tabla periódica.

En la formulación de un vitrificado, en principio son válidos los siguientes criterios:

- En igualdad de condiciones, la estructura cristalina es más resistente que la vítrea. Por tanto el fomento de la desvitrificación (recristalización parcial del vidrio) es aconsejable siempre y cuando el vidrio residual no sea muy débil y lixivie fácilmente.
- El factor complejidad de cationes, que forman parte del grupo de los óxidos modificadores de retículo, favorece la fusión más prematura a la par que forma un vidrio más complejo y resistente. Esta propiedad es claramente favorable a la aplicación de la vitrificación a la inertización de residuos.

Una vez el residuo ha sido confinado en el seno del vidriado, aquél pasa a formar parte de la naturaleza vítrea y debe considerarse como un todo. Así, en rigor debe hablarse de silicatos.

La vitrificación es, de momento, la única tecnología que permite el tratamiento seguro de las cenizas procedentes del tratamiento térmico de los RSU y de los fangos de EDAR, ya que admite:

- *Materia inorgánica.* La perteneciente al propio fango, en este grupo se incluyen los metales. En el proceso térmico previo la mayoría de los metales se habrán oxidado y algunos se hallarán en forma de sales.
- *Sales secundarias.* La inmensa mayor parte de las sales pueden clasificarse de elementos se-

cundarios ya que no estaban en el fango original, y se han formado gracias a la acción de los reactivos añadidos para neutralizar los gases ácidos. La problemática añadida es que muchas de estas sales son solubles.

- *Reactivos en exceso.* Buena parte de los reactivos que se añaden al proceso quedan sin reaccionar. Ello es debido a que la baja cinética de estos compuestos obliga a adicionarlos en exceso. Parte de los reactivos interacciona con los metales para formar sales.
- *Material particulado.* De difícil catalogación ya que si bien una parte procede de la propia estructura inorgánica del fango o del RSU, otra es fruto de la abrasión y del árido desgastado que compone el lecho fluidizado.
- *Compuestos orgánicos.* Los hidrocarburos de cadena pesada son compuestos muy estables y si bien en la cámara de postcombustión se destruyen, en la etapa de enfriamiento, en la caldera, el tiempo es suficientemente largo como para dar lugar a la reformación de organoclorados que deberán abatirse con la inyección de carbón activo.

Con todo, la estructura química de la ceniza de fango no es vitrificable por si sola y es preciso añadirle otros compuestos, básicamente cuarzo (formador de vidrio) para que el conjunto vitrifique (Todo ello se explica ampliamente en el Capítulo 7).

6.6.3.7. *A título de conclusión sobre el tratamiento de residuos secundarios*

Todo proceso de valorización en el que intervengan sustancias potencialmente contaminantes, como serían las cenizas resultantes de los procesos térmicos de los fangos de EDAR o la incineración de RSU, hay que analizarlo bajo dos puntos de vista diferentes pero complementarios:

- La contaminación originada por el proceso elegido. Es decir, durante todo el proceso de valorización no se permite que se emitan contaminantes: metales, compuestos orgánicos, olores, etc.
- Los metales presentes deben quedar fijados en la matriz de tal manera que bajo ninguna circunstancia puedan salir al exterior.

La Figura 3.21 intenta reproducir de manera sintética los tres tipos de valorizaciones cerámicas, aunque en capítulos posteriores se detalla la profunda diferencia entre clínquerización, ceramización y vitrificación no obstante, desde el punto de vista de formación de materiales los diversos procesos son todos ellos cerámicos, que es posible aplicar a las cenizas de fangos de EDAR o a las cenizas de RSU.

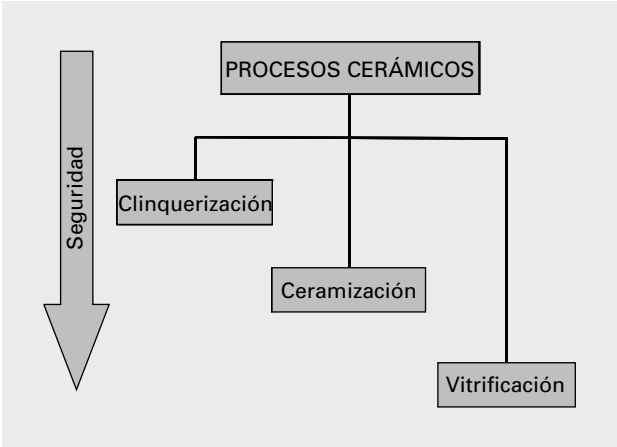


Figura 3.21. Seguridad en las valorizaciones cerámicas.

Es preciso señalar que las dos primeras, la clínquerización y la ceramización admiten también el fango entero, es decir fracción orgánica e inorgánica, mientras que la vitrificación está pensada tan solo para el tratamiento de la fracción inorgánica. La fracción orgánica desaparece en los tratamientos a alta temperatura, como acontece en todos los procesos indicados, mientras que la inorgánica, en líneas generales se comporta de la siguiente manera:

- En la clínquerización, las reacciones tienen lugar, básicamente en estado sólido, sin intervención significativa de la fase amorfa. Ello equivale a decir que los óxidos metálicos difícilmente quedarán insertados en la matriz del clínquer, si bien algunos óxidos pueden quedar adheridos (adsorbidos) a la matriz.
- En la ceramización, los óxidos pasan a formar parte de la matriz cerámica. Se tratará pues de elegir un mineral de arcilla que cree mayor fase amorfa a una temperatura inferior a la de volatilización de los diversos óxidos procedentes del fango.
- En la vitrificación todos los óxidos pasan a formar parte del vidrio.

En primera conclusión, de cara a la valorización de la fracción inorgánica del fango de EDAR y las cenizas de incineración de RSU, la tecnología más segura de inertización (entendida como sinónimo de irreversibilidad en lo referente a la inserción de me-

tales) es la vitrificación, seguida de la ceramización y, a mayor distancia, la clínquerización.

Si ahora se tiene en cuenta, además de los metales y la fracción mineral inorgánica, el resto de los componentes de la ceniza como las sales solubles y el carbón activo (que alberga buena parte de los metales), el panorama cambia ya que:

- En la clínquerización, la atmósfera oxidante y la elevada temperatura que impera en los alrededores de las partículas sólidas oxidarán las partículas de carbón activo y liberarán los metales que, en su gran mayoría se emitirán a la atmósfera, si bien algunos óxidos pueden quedar adheridos (adsorbidos) a la matriz del clínquer.
- En la ceramización, las sales solubles se diluirán en toda la masa cerámica dando lugar a eflorescencias y alterando la reología y las condiciones de flujo de la masa cerámica que puede dar lugar a una incompatibilidad total.
- En la vitrificación, en hornos de capa fría, gracias a la formación de eutécticos todos los componentes de las cenizas quedan incorporadas a la masa de vitrificado.

Así pues, y a título de conclusión tanto desde la óptica técnica como ambiental no todas las tecnologías que, a primera vista parecen correctas, deben ser aceptadas no sin antes llevar a cabo un análisis profundo del proceso y sus consecuencias, en particular si se trata de residuos tóxicos.

7. Técnicas energéticas

Existe una infinidad de sistemas térmicos para el tratamiento de residuos que no son el objeto de esta obra. En ella se tratan algunas de ellas de acuerdo con el siguiente criterio:

- Procesos térmicos de alta temperatura, que se explican con detalle cuando se lleva a cabo su aplicación a la valorización de una determinada tipología de residuos, por ejemplo la vitrificación u otros procesos cerámicos.
- Procesos de baja temperatura, los llamados bioquímicos. Entre los que destacan la metanización y el compostaje.
- Procesos de descontaminación de suelos por vía térmica.

7.1. PROCESOS TÉRMICOS Y TRATAMIENTO DE RESIDUOS

A título de ejemplo se dedican unas líneas al horno de clínquer, que se amplian en el Capítulo 6, representado en la Figura 3.22.

El hecho de que el horno de clínquer alcance una temperatura de trabajo de 1.300 ℃ (valor notablemente superior a la mayoría de incineradoras) con un tiempo de residencia de los gases muy prolongado, aporta unas importantísimas propiedades que han sido empleadas de manera masiva en la valorización de residuos, ya que permite la:

- Posibilidad de usar residuos orgánicos como combustible. En Estados Unidos esta aplicación es habitual, empleándose disolventes usados, aceites de automoción usados, neumáticos fuera de uso, etc. En la actualidad se calcula que cerca del 7% del combustible que consumen los hornos de clínquer tiene este origen.
- Posibilidad de sustituir las materias primas tradicionales en la fabricación del cemento (caliza, arcilla, arena, etc.), por ciertos residuos: lodos conteniendo cal, cerámicas, polvo de carbón, abrasivos, arena de fundición, carcasas de filtros usados, etc.

Obviamente, en función del combustible-residual elegido hará falta someterlo a un pretratamiento: homogeneización, secado, mezcla, trituración, etc.

Muchos compuestos inorgánicos, debidamente dosificados y combinados, son incorporados al retículo cristalino del clínquer consiguiendo la inmovilización de ciertos metales pesados y, por tanto, los residuos se comportan como materias primas. En los hornos de clínquer acontece algo semejante a lo explicado en los procesos de vitrificación a altas temperaturas. Las reacciones que tienen lugar en el interior del horno de clínquer son en fase sólida, es decir, sin intervención de un líquido. Así pues, los metales pesados muy volátiles, como mercurio y talio, e incluso los medianamente volátiles, como zinc o plomo, tienen pocas posibilidades de ser atrapados en la estructura del clínquer, por lo que serán emitidos a la atmósfera. Otros metales más refractarios, como cro-

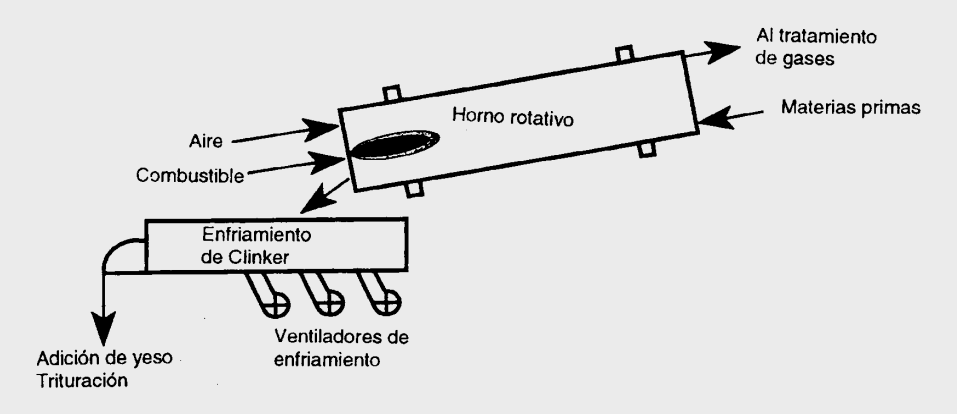


Figura 3.22. Tratamiento de residuos en un horno de clínquer.

mo, níquel o cobre, tampoco son debidamente atrapados a causa de una deficiente reactividad. Por esta razón, las fábricas de cemento son buenas destructoras de residuos orgánicos, que, a la vez, liberan un calor de reacción y pueden incorporar residuos conteniendo determinados metales pesados a base de adicionarlos al clínquer fuera del horno para la formulación del cemento, como sería el caso de emplear escorias micronizadas en lugar de cenizas volantes de centrales termoeléctricas.

La composición del cemento Portland admite la inclusión de ciertas trazas de metales; además, en el caso de disolventes clorados, y dentro de ciertos límites, el horno de clínquer actúa como un *scrubber*.

8. Técnicas biológicas

Ciertos productos orgánicos pueden ser degradados a materiales relativamente inocuos mediante la acción biológica de microorganismos. Una característica general que poseen estos residuos biodegradables es que son miscibles en agua y se presentan en bajas concentraciones.

Habitualmente, estos residuos orgánicos industriales se generan en grandes cantidades, poseyendo una elevada demanda biológica de oxígeno (DBO). Se diferencian de los residuos domésticos en los siguientes aspectos: elevada proporción de compuestos orgánicos, concentración de contaminantes biodegradables, contenido en nutrientes inorgánicos y presencia de sustancias tóxicas en la biomasa.

La energía y los constituyentes de la materia orgánica son transformados por los organismos heterótrofos para su crecimiento. Este proceso, que llevan a cabo desde mamíferos, hasta organismos unicelulares, conlleva la transformación de la materia orgánica en biomasa celular, en otros componentes con mayor o menor contenido energético y en la liberación de energía, dependiendo del metabolismo utilizado.

Los microorganismos anaerobios transforman la materia orgánica en biomasa celular, en compuestos inorgánicos y en una mezcla de compuestos gaseosos, de los cuales el metano es el más importante. El proceso catalizado por estos microorganismos en condiciones controladas recibe el nombre de digestión anaerobia, y tiene un interés indudable desde el punto de vista de gestión de residuos orgánicos y de valorización energética de estos.

Los microorganismos aerobios transforman materia orgánica en biomasa celular, con tasas superiores a los anaerobios, y en compuestos oxidados, siguiendo reacciones exotérmicas que producen un incremento de la temperatura del medio y la consecución de otros procesos. El proceso catalizado por estos microorganismos en condiciones controladas recibe el nombre de compostaje y, a pesar de que está considerado como un sistema de valorización energética, tiene lugar gracias a la transformación de la energía contenida en la materia orgánica, para dar lugar a compuestos finales de utilidad agronómica. Por tanto, tiene un interés indudable desde el punto de vista de la gestión de residuos orgánicos.

Los dos procesos, por separado o combinados, son conservativos para los nutrientes, esto es, se mantienen en el sistema cambiando tan solo su estado de oxidación. Por ello, son procesos clave en una estrategia de reciclado de nutrientes.

Como técnicas biológicas destacan el proceso de compostaje y la biometanización, ambas desarrolladas en apartados posteriores. Sin embargo y dentro de un criterio más amplio se debería distinguir entre:

- *Procesos aerobios*. En el campo del tratamiento de residuos el ejemplo más representativo es el compostaje o el proceso de fangos activados en el tratamiento de las aguas residuales
- *Procesos ananeróbios*. En el campo del tratamiento de residuos la metanización o las cogedistiones están tomando una notable relevancia en los últimos tiempos.
- *Procesos mixtos*. Los fenómenos que tienen lugar en un vertedero intervienen procesos aerobios y más tarde anaeróbios.

La empresa francesa Vinci y la japonesa Mitsubishi Materials han desarrollado un alquitrán ecológico al que han bautizado como NOxer que es capaz de absorber hasta un 90% de las moléculas de dióxido de nitrógeno cuando está en contacto con la calzada (a otras alturas la absorción alcanza un 30% de la emisión de NO_x que salen de los tubos de escape de los vehículos). El costo aparentemente elevado, de entre 10 a 15 €/m^2, no es un inconveniente cuando se lo considera como una opción frente al pavimento convencional y el antirruido que ya ronda los 10 €/m^2.

Las nuevas investigaciones llevadas a cabo por los inventores de NOxer están dirigidas a incluir en una fórmula nuevos componentes que puedan absorber también el CO_2 para así reducir el efecto invernadero.

8.1. LA CODIGESTIÓN ANAEROBIA

En el caso de los purines de cerdo, en el mejor de los casos la máxima concentración de material seco puede alcanzar el 15%, lo normal en España es que sea del 2 al 8%. Además el purín de cerdo presenta el inconveniente de su baja tasa de transformación en metano, lo que conduce a que: este tipo de plantas de tratamiento solo alcanzarán la rentabilidad si se mezcla el purín con otros residuos mas energéticos. En ello se ha trabajado y se han logrado buenos resultados en la denominada codigestión. Esto es, la digestión de los purines con fangos de los mataderos o de otra procedencia que aseguren una gran cantidad de materia orgánica, en especial lípidos.

En el norte de Alemania se han construido plantas de tratamiento de aguas procedentes de los mataderos que son energéticamente sustentables. Esto es, el biogás producido en el digestor cubre todas las necesidades térmicas de la industria y la electricidad generada es suficiente para atender a la demanda eléctrica del matadero. En Dinamarca existen bastantes plantas donde junto a los purines (70% en peso) se añade un 30% de residuos cárnicos ricos en proteínas, estas plantas son energéticamente autóctonas y además pueden exportar energía eléctrica.

El cotratamiento consiste en el tratamiento conjunto de residuos orgánicos diferentes, con el objetivo de:

- Aprovechar la complementariedad de las composiciones para permitir perfiles de proceso más eficaces.
- Compartir instalaciones de tratamiento.
- Unificar metodologías de gestión.
- Amortiguar las variaciones temporales en composición y producción de cada residuo por separado.
- Reducir costes de inversión y explotación.

El término codigestión se utiliza para expresar la digestión anaerobia conjunta de dos o más sustratos de diferente origen. La ventaja principal radica en el aprovechamiento de la sinergia de las mezclas, compensando las carencias de cada uno de los sustratos por separado. La codigestión de residuos orgánicos de diferente origen ha resultado una metodología exitosa tanto en régimen termofílico como mesofílico.

Se han conseguido buenos resultados para mezclas de residuos ganaderos con varios tipos de residuos de la industria de carne y mataderos, ricos en grasas, consiguiendo altas producciones de metano, del orden de 47 m^3/tonelada de residuo introducido. También se han conseguido buenos resultados con la codigestión de fangos de depuradora y la fracción orgánica de residuos municipales, la mezcla de estos últimos con aguas residuales urbanas, y la codigestión de fangos de depuradora y residuos de frutas y verduras. Los residuos urbanos e industriales acostumbran a contener altas concentraciones de materia orgánica fácilmente degradable, por lo cual presentan un mayor potencial de producción de biogás que los residuos ganaderos, como indica la Tabla 3.8, pudiendo llegar a 1.000 m^3 de biogás por tonelada de residuo.

Sin embargo, estos residuos pueden presentar problemas en su digestión, como deficiencia en nutrientes necesarios para el desarrollo de microorganismos anaerobios, baja alcalinidad o excesivo contenido en sólidos que provoquen problemas mecánicos. Los residuos ganaderos, pueden ser una buena base para la codigestión ya que, generalmente, presentan un con-

Tabla 3.8. Potenciales de producción de biogás de algunos residuos orgánicos de la industria alimentaria y de la fracción orgánica de residuos municipales (Angelidaki y Ahring, 1997)

Tipo	Contenido orgánico	Sólidos volátiles (%)	Producción de biogás (m^3/tonelada)
Intestinos + contenidos	Hidratos de carbono, proteínas, lípidos	15-20	50-70
Fangos de flotación	65-70% proteínas, 30-35% lípidos	13-18	90-130
BBO (tierras filtrantes de aceites, con bentonita)	80% lípidos, 20% otros orgánicos	40-45	350-450
Aceites de pescado	30-50% lípidos	80-85	350-600
Suero	75-80% lactosa, 20-25% proteínas	7-10	40-55
Suero concentrado	75-80% lactosa, 20-25% proteínas	18-22	100-130
Hidrolizados de carne y huesos	70% proteínas, 30% lípidos	10-15	70-100
Mermeladas	90% azúcares, ácidos orgánicos	50	300
Aceite soja/margarinas	90% aceites vegetales	90	800-1000
Bebidas alcohólicas	40% alcohol	40	240
Fangos residuales	Hidratos de carbono, lípidos, proteínas	3-4	17-22
Fangos residuales concentrados	Hidratos de carbono, lípidos, proteínas	15-20	85-110
FORM separado en origen	Hidratos de carbono, lípidos, proteínas	20-30	150-240

tenido en agua elevado, una alta capacidad tampón y aportan una amplia variedad de nutrientes necesarios para el crecimiento de microorganismos anaerobios.

En la Figura 3.23 se indican las características relativas para la codigestión. Flechas de sentidos diferentes indican un posible interés en la mezcla, al compensarse la carencia relativa de uno de los dos residuos. La alcalinidad de fangos de planta depuradora presenta tal variabilidad que es difícil su caracterización relativa.

Se han conseguido, mediante mezclas de purines de cerdo con tierras filtrantes residuales de aceite de oliva, al 5% en peso, incrementos en la producción de metano del 100% en régimen mesofílico. También existen experiencias positivas con mezclas de purines con residuos de la industria de los zumos de fruta.

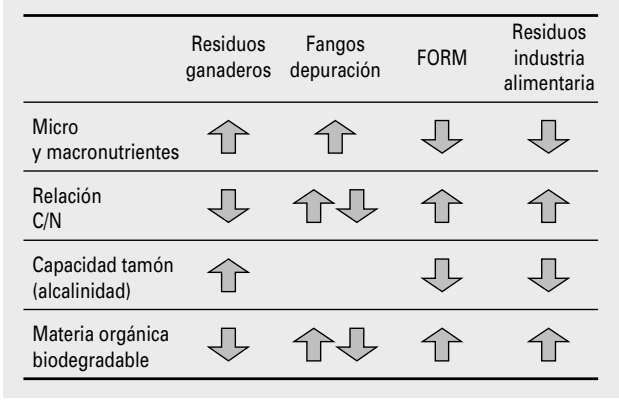


Figura 3.23. Caracterización relativa para la codigestión de diferentes residuos orgánicos.

La codigestión de fangos de depuradoras de aguas residuales y de purines de cerdo ha dado mejores resultados que si se tratan por separado, ya que la mezcla compensa las carencias que cada uno de los materiales presenta por separado.

8.2. LA PASTEURIZACIÓN

La pasteurización es un proceso de calentamiento de un producto, hasta una temperatura que oscila entre 55 y 70 ℃ para destruir las bacterias perjudiciales, sin producir cambios materiales en la composición, en el sabor, o en el valor nutritivo del producto. El proceso se llama así en honor del químico francés Louis Pasteur, quien lo ideó en 1865 con el fin de inhibir la fermentación del vino y de la leche. La leche se pasteuriza al calentarla a 63 ℃ durante 30 minutos, luego se enfría con rapidez, y se envasa a una temperatura de 10 ℃.

Hoy en día la mayor parte de los alimentos envasados se pasteurizan, en particular los derivados de la leche y los huevos pero también la cerveza y el vino se pasteurizan al ser calentados a unos 60 ℃ durante unos 20 minutos. Según un método más reciente, calentando a 70 ℃ durante 30 segundos y envasando en condiciones estériles, el proceso es suficiente para garantizar la higiene sanitaria.

En el campo de los residuos, este sistema ha sido desarrollado por la firma VOMM para el reciclaje y tratamiento de los residuos fermentables orgánicos. En síntesis consiste en introducirlos, parcialmente tri-

turados en un turbo calentador y mantenerlos el tiempo preciso para inhibir el efecto pernicioso de los gérmenes patógenos presentes. Algunas bacterias son resistentes y pueden sobrevivir tras el pasteurizado, pero estas bacterias no causan enfermedades a las personas ni a los animales. Este proceso no altera el olor, el sabor, la composición ni el contenido nutricional.

El material resultante de aplicar esta tecnología a los restos fermentables, por ejemplo residuos de frutas y verduras, es dado a los animales. El proceso ha sido probado satisfactoriamente en Brasil para el engorde de cerdos.

El principio de funcionamiento, consta de un molino que tritura el residuo hasta un tamaño que permita la alimentación al higienizador, también denominado «cocinador» (Turbo Cooker VOMM). El producto seco, pero ahora desprovisto de gérmenes, es hidratado de nuevo (recibiendo el nombre de «pastone») y almacenado en tanques para su homogeneización y distribución.

La principal aplicación consiste en el tratamiento de residuos de naturaleza orgánica fermentable como puede ser el rechazo de frutas y verduras de los grandes centros de acopio o plantas de tratamiento de cultivos específicos como mandioca, piña, patata, plátano, etc. El proceso permite la higienización por eliminación de los gérmenes patógenos y mantiene intacto su poder nutritivo (en la mayoría de estas especies tanto en la pulpa como en la piel hay gran cantidad de hidratos de carbono pero también proteínas y vitaminas), lo que permite sustituir o disminuir la típica alimentación a base de maíz o sorgo.

8.3. FILTROS BIOLÓGICOS PARA LA DESODORIZACIÓN

Los filtros biológicos se utilizan para adsorber los olores en los gases de determinados procesos. Están diseñados de manera que puedan soportar variaciones de carga sin que su rendimiento se vea sensiblemente afectado. La mayoría de estos sistemas recirculan el afluente tratado para aumentar el rendimiento**.**

Normalmente su funcionamiento no se halla condicionado por un sistema limitante. Así cuando el afluente ha saturado la capacidad de adsorción del filtro, el gas sigue pasando sin que se ejerza ningún tipo de depuración.

La digestión en el filtro es fundamentalmente aeróbia, aunque puedan presentarse zonas anaerobias en capas menos superficiales (Si hay zonas anaerobias se produce metano). El rendimiento, en cuanto a la eliminación, y en función de la materia orgánica de la DBO, es del 75 al 90%.

Se trata de pequeños reactores cuyo soporte es un material poroso en cuyo interior una serie de microorganismos van catalizando biológicamente y llevando a cabo reacciones. Solo en el año 1995 el 50% de las denuncias, especialmente en verano, presentadas a la Administración eran debidas a malos olores.

Las principales ventajas de estos sistemas biológicos son:

- Ausencia de reactivos y no genera residuos secundarios.
- La esperanza de vida varía de 1 a 7 años.
- No necesita personal especializado y poco mantenimiento.

Los rellenos más usuales son la turba fibrosa, cortezas o compost. La carga específica normal de trabajo oscila de 50 a 400 m^3/m^2 h. Los principales compuestos provenientes de las sustancias contaminantes comunes, suelen ser el sulfuro de hidrógeno y el ácido butírico, todo ello con una eficacia razonable. El dimetilmercaptano o el disulfuro de metileno o las aminas sufren reacciones muy similares. Factores como la temperatura o el amoníaco pueden destruir la fauna.

En el punto 9 del DVD adjunto aparece diversa información relacionada con la construcción y aplicación de los biofiltros.

9. Sistemas mixtos

En la práctica, y en particular para la valorización de residuos, se utiliza una combinación de técnicas de tratamiento de residuos, o bien de procesos industriales con base esencialmente biológica más o menos adecuados para cumplir con todos los requisitos medioambientales, atendiendo al posible impacto que puede causar el hecho de manejar una sustancia tóxica sin las debidas precauciones.

La Figura 3.24 muestra un proceso de inertización de residuos procedentes de la industria química por vía química y posterior sinterización por calor. El proceso se inicia con la neutralización de los resi-

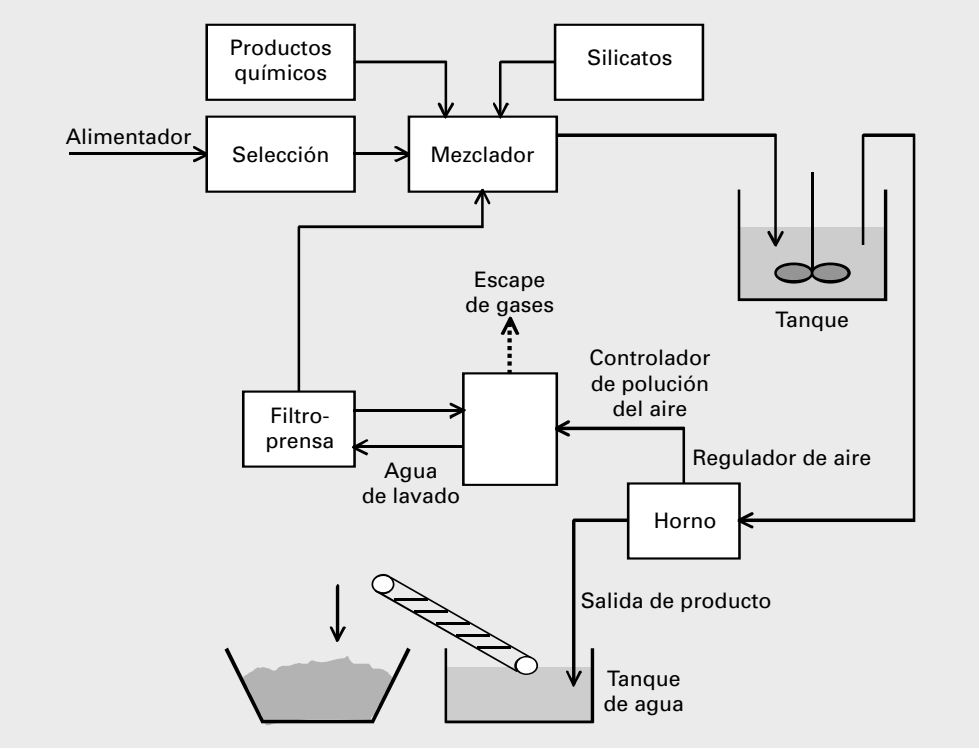


Figura 3.24. Esquema de un proceso mixto de inertización.

duos en un tanque una vez se le han añadido las partículas generadas en el propio proceso y los reactivos precisos para la estabilización o inertización. La siguiente fase es la introducción en un horno donde la temperatura provoca una sinterización (solidificación) del material. A la salida se vierte sobre agua para su enfriamiento y transporte al vertedero. Las emisiones generadas en el interior del horno son recuperadas e incorporadas de nuevo al proceso; los gases, una vez filtrados son emitidos a la atmósfera.

A lo largo de los capítulos siguientes se exponen una serie interminable de combinaciones de diversos sistemas de tratamiento que tienen como resultado final la valorización de un residuo complejo.

9.1. EL PROCESO DE FANGOS ACTIVADOS

Resulta ciertamente difícil incluir el proceso de producción de fangos procedentes de las estaciones depuradoras de aguas residuales en uno de los apartados desarrollados anteriormente. Sin embargo, y dada su trascendencia, se ha optado por integrarlo en el apartado de sistemas mixtos ya que, en realidad, el proceso se compone de una serie de subprocesos de índole física, biológica, química, etc. Los fangos son el resultado último de la depuración de las aguas ya sea del proceso primario como secundario. El origen genérico de los fangos se divide, en función de su lugar de origen, en las siguientes etapas:

- *Espesamiento:* es la operación que tiene lugar en los decantadores y espesadores. A la salida el fango tiene un contenido en sólidos que oscila entre un 3 y un 8%.
- *Deshidratación:* es la siguiente operación y tiene por objeto aumentar el contenido en sólidos hasta un valor medio del 25%. Suele llevarse a cabo por medios mecánicos: filtros banda, filtros-prensa, centrífugas, etc.
- *Estabilización química:* es una operación que se realiza para eliminar la posible actividad química remanente en el fango. El método más usual consiste en la adición de cal.

Ú ltimamente se procede al secado térmico de fangos para aumentar el contenido en materia seca hasta el 90%. El alto grado de depuración de las aguas genera unas grandes cantidades de fangos, que están compuestos mayoritariamente por agua y materia orgánica, y además incluyen otros compuestos en concentraciones menores. Entre estos compuestos minoritarios se encuentran unos grupos de contaminantes que son los que definen la calidad de los fangos:

- *Metales pesados.* Su peligrosidad radica principalmente en su potencial de acumularse en los

tejidos humanos, y en el aumento de los riesgos para la salud y el medio ambiente que comportan al irse extendiendo y bioacumulando a través de las cadenas tróficas de los ecosistemas. Los principales metales que se encuentran en los fangos son zinc, cobre, níquel, cadmio, plomo, mercurio y cromo. En las zonas donde las aguas residuales urbanas se mezclan con las provenientes de las actividades industriales, como es el caso de muchas zonas industrializadas, la presencia de metales pesados puede ser muy importante. La Tabla 3.9 muestra los valores medios de metales de diversos fangos de depuradoras del cinturón industrial de Barcelona.

Tabla 3.9. Concentración de metales pesados hallados en fangos de EDAR de la zona industrial de Barcelona

Metal	Rango (ppm)	Valor medio (ppm)
Plomo (Pb)	13-19.700	1.640
Cobre (Cu)	84-10.400	1.210
Cadmio (Cd)	3-3.410	110
Manganeso (Mn)	18-7.100	380
Arsénico (As)	6.230	43
Molibdeno (Mo)	5-39	28
Zinc (Zn)	100-27.800	2.790
Níquel (Ni)	2-3.520	320
Cromo (Cr)	10-99.000	2.620
Boro (B)	4.760	77
Cobalto (Co)	1-18	5
Mercurio (Hg)	0,2-10.600	733

- *Nutrientes mayoritarios de las plantas.* Los principales nutrientes son nitrógeno, fósforo y potasio; el principal problema radica en la potencial eutrofización del suelo y de las aguas superficiales debido a las grandes concentraciones de estos elementos que presentan los fangos. Siguiendo con la misma tónica anterior, la Tabla 3.10 muestra las proporciones normales de los denominados nutrientes, incluyendo el carbono.

Tabla 3.10. Porcentaje de nutrientes hallados en fangos de EDAR de la zona industrial de Barcelona

Elemento	Rango (%)	Valor medio (%)
C orgánico	5-48	31
N total	0,1-17,5	3,9
P total	0,1-14,3	2,5
S total	0,6-1,5	1,1

- *Contaminantes orgánicos.* El principal problema son los posibles impactos que estos contaminantes puedan tener sobre el medio ambiente y, particularmente, sobre la salud humana. Una característica específica de estos contaminantes es la variabilidad que presentan al biodegradarse, existiendo contaminantes difícilmente biodegradables y otros con velocidades de biodegradación relativamente rápidas. Los principales contaminantes de este tipo que se encuentran en los fangos son pesticidas, disolventes industriales, tintes, etc., e incluso se encuentran hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAH). Para eliminar este tipo de contaminantes biodegradables se deben favorecer largos tiempos de residencia de los fangos.
- *Agentes patógenos.* En los fangos también se encuentran bacterias, virus, protozoos, etc., de forma que, para que cualquier disposición sea segura, es necesario, al menos, un cierto grado de inactivación, o inertización, de estos agentes patógenos. Para conseguirlo se puede recurrir a pasteurización, digestión aerobia o anaerobia, compostaje, etc.
- *Elementos mayoritarios.* Los denominados elementos mayoritarios son, básicamente, minerales y/o compuestos de naturaleza inorgánica, entre los que cabe destacar cuarzo, carbonatos (la mayor parte del calcio procede de la cal o de su carbonación), feldespatos, arcillas, etc. Siguiendo con el mismo tipo de fangos que los descritos en las tablas anteriores, la Tabla 3.11, reproduce la cantidad de elementos mayoritarios.

En el punto 10 del DVD adjunto se muestra información complementaria sobre el proceso de fangos activados, así como los sistemas de aireación.

Tabla 3.11. Porcentaje de los componentes mayoritarios hallados en fangos de EDAR de la zona industrial de Barcelona

Elemento	Rango (%)	Valor medio (%)
Sodio (Na)	0,01-3	0,4
Potasio (K)	0,02-2,5	0,6
Calcio (Ca)	0,1-25	4,9
Magnesio (Mg)	0,03-1,9	0,55
Bario (Ba)	0,001-0,9	0,6
Hierro (Fe)	0,1-15,3	1,3
Aluminio (Al)	0,1-13,5	1,2
Silicio (Si)	1-35	7,5

9.1.1. El poder calorífico de los fangos

Los fangos constituyen una tipología de residuos muy importante y, sobre todo, procedentes de los tratamientos biológicos. Los fangos de EDAR contienen una cantidad importante de materia orgánica, que oscila entre el 50 y el 65% de la fracción seca según el tipo de tratamiento aplicado. Así, un fango procedente de un tratamiento biológico tendrá un contenido mayor en materia orgánica en detrimento de la fracción inorgánica. Esta cantidad representa una capacidad energética que cada vez es más valorada en los tratamientos de fangos, ya que puede aportar la energía precisa para un proceso de gasificación o una incineración y reducir en gran manera los costes de tratamiento y eliminación que día a día van en aumento.

La capacidad calorífica se mide mediante el poder calorífico inferior (PCI), definido como la cantidad de calor que se desprende en la combustión completa, a presión y temperatura en condiciones normales (0 ℃ y 1 atm, respectivamente), de 1 kg de combustible sólido, líquido o gaseoso (siempre totalmente seco, con independencia del estado en que se presente) cuando el agua procedente de la combustión se halla en estado de vapor. Como es obvio, y tal y como queda reflejado en la Figura 3.25, existe una cierta correlación entre el PCI y el contenido de materia orgánica de los fangos. Las diferencias son debidas a la naturaleza y cantidad de los compuestos volátiles procedentes del fango. La Figura 3.25 representa el poder calorífico de tres tipos de fangos según su contenido en materia orgánica.

Toda la temática energética relacionada con los fangos de EDAR se halla desarrollada en el Capítulo 12.

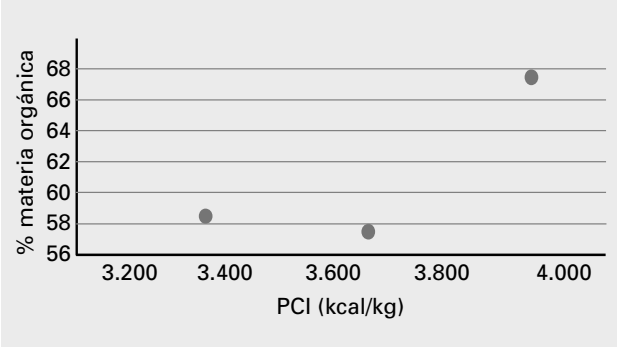


Figura 3.25. Relación entre el PCI de tres tipos de fangos de EDAR y su contenido en materia orgánica.

9.1.2. Biorreactores de membranas para la simplificación de las EDAR's

Los principales factores determinantes de un tratamiento biológico de depuración de aguas residuales son la relación entre la cantidad de la biomasa y los vertidos a depurar así como la capacidad de la clarificación.

El dilema de los sistemas tradicionales es que una gran cantidad de biomasa, que por su parte aumenta la eficacia de depuración, requiere una mayor capacidad (superficie) del clarificador para evitar la salida de sólidos al final del tratamiento. Bajo el concepto «Biorreactores de Membranas» (MBR) se entiende la combinación de un reactor biológico de fangos activados con un sistema de membranas.

Por tratarse de un filtro muy fino, las membranas no solamente retienen todos los sólidos sustituyendo así el decantador, sino también retienen todos los microorganismos como algas y bacterias, lo que conlleva a una mejora de la calidad significante. En función del tipo de membrana utilizada incluso se retienen los virus.

Gracias al hecho que las membranas representan una barrera física, que retiene los sólidos independientemente de su concentración, se puede aumentar de forma considerable la cantidad de biomasa en el biorreactor. Este hecho redunda en un aumento de la eficacia (rendimiento) de la depuradora.

El volumen del biorreactor de un sistema MBR puede ser reducido aproximadamente a una cuarta parte del de un reactor equivalente a un sistema convencional. Esto, junto con el hecho de que no hace falta un decantador, permite una reducción apreciable de la superficie necesaria para la construcción de una depuradora tipo MBR.

En los sistemas MBR normalmente se emplean membranas de microfiltración (rango de separación entre 10 y 0,1 μm) o de ultrafiltración (rango de separación entre 0,1 y 0,01 μm).

Se puede distinguir básicamente entre dos sistemas de MBR. Por un lado las membranas pueden ser instaladas de forma sumergida en el propio reactor biológico, o en compartimentos separados comunicados con el reactor. Por otro lado hay sistemas en los cuales las membranas quedan instaladas de forma seca en el exterior del reactor.

En los MBR con membranas sumergidas se utilizan normalmente módulos de fibra hueca o módulos de placas. La filtración se realiza por depresión (hasta 0,6 bar) de tal manera que el agua penetra por la

superficie porosa y sale por el centro de la fibra o placa. Los sólidos quedan retenidos en la superficie externa y son removidos al reactor por efecto mecánico causado por las burbujas de aire.

En el caso de los sistemas de MBR con membranas externas, la filtración se realiza por presión según el principio de filtración tangencial desde fuera a dentro o al revés. Normalmente se aplican membranas tubulares pero también pueden ser de otros tipos. Comparando con los sistemas sumergidos, los MBR externos requieren más energía para la filtración, pero tienen una mayor capacidad de filtración por superficie de membrana y su mantenimiento es más fácil.

En principio no se puede decir que un sistema sea superior al otro. La elección del mejor sistema para una determinada aplicación depende de los respectivos factores técnicos y económicos.

Resumiendo se puede decir que la aplicación de la tecnología de membranas en el tratamiento de aguas residuales presenta las siguientes ventajas:

- Se puede aumentar la eficacia y/o la capacidad de depuradoras existentes sin la necesidad de ampliar las instalaciones.
- El coste de inversión de nuevas instalaciones resulta más económico, debido a un requerimiento menor de espacio y la eliminación de los decantadores secundarios.
- El agua residual tratada tiene una mejor calidad y cumple por ejemplo con la legislación europea con respecto a aguas de baño.
- Hay una mejor garantía de la calidad de los vertidos debido a la separación de partículas no sedimentadas en casos de «bulking» por ejemplo o en vertidos accidentales de hidrocarburos.

10. Regeneración de disolventes usados

Desde un punto de vista medioambiental, la problemática de los disolventes se refiere a un extenso grupo de sustancias orgánicas que son ampliamente utilizadas por su gran capacidad de disolución de otros productos; por tanto, cuando ya han sido usados, incorporan una notable carga contaminante, además de valorar la propia naturaleza del disolvente. Los disolventes más comunes se enuncian a continuación:

- *Hidrocarburos:* benceno, hexano, tolueno, xileno, etc.
- *Alcoholes:* metanol, etanol, isopropanol, etc.
- *Cetonas:* acetona, metiletilcetona (MEK), etc.
- *Halogenados:* tetracloruro de carbono, percloroetileno, CFC's, cloruro de metilo, 1,1,1-tricloroetano, tricloroetileno, etc.

La ventaja que presentan los disolventes es que poseen una alta tensión de vapor, propiedad que se utiliza para su valorización. Además, como el precio de los disolventes es relativamente elevado, ello constituye un incentivo para su reciclaje. Sobre este tipo de residuos tóxicos y peligrosos, el establecimiento de prácticas de prevención en empresas e industrias conducirá a un ahorro económico derivado del menor consumo de materias primas y el más fácil tratamiento posterior del residuo generado. Son diversas las técnicas de reducción en origen que se pueden llevar a cabo con los residuos clasificados como peligrosos:

- *Aceites usados.* Evitar la mezcla con otras sustancias que impidan su recuperación posterior, y unificar los diferentes tipos de aceites utilizados en las actividades industriales.
- *Taladrinas.* Disponer de un mantenimiento preventivo de la maquinaria y de los equipos, y emplear circuitos cerrados con sistemas de filtración y decantación.
- *Disolventes halogenados.* Emplear máquinas herméticas para reducir la emisión atmosférica de compuestos orgánicos volátiles.
- *Disolventes no halogenados.* Reducir las emisiones mediante procesos de adsorción con carbón activo.
- *Residuos del tratamiento de superficies.* Sustituir el ácido sulfúrico por ácido clorhídrico, y eliminar los compuestos cromados.

La recuperación y reciclado de los materiales valorizables contenidos en los residuos son operaciones que garantizan la protección del medio ambiente y el aprovechamiento óptimo de los residuos. En el caso de los aceites usados, a pesar de su alto contenido en agua hace que sean valorizables mediante procesos de combustión. La destilación permite la recuperación de los aceites lubricantes contenidos en los aceites usados y su posterior comercialización. Con los disolventes usados, es conveniente separar en origen los halogenados de los no halogenados. Mediante procesos de centrifuga-

ción y filtración se elimina el agua y los sólidos en suspensión. Posteriormente, la destilación permitirá recuperar el disolvente. Con frecuencia, y debido a su elevada carga contaminante, o bien al coste que representa la recuperación del disolvente exento completamente de contaminante, se elabora un disolvente regenerado de «segunda clase». Para numerosas aplicaciones este método es perfectamente aceptable, siempre y cuando la carga contaminante residual no afecte al medio o a su futura aplicación. El principal problema es que estos disolventes regenerados han tenido el grueso de su consumo en el sector de barnices y pinturas, el cual ha restringido muy sustancialmente su consumo por razones de salud laboral y medioambiental.

En la planta de regeneración, una vez comprobado que el disolvente usado es regenerable, se introduce en el reactor que vaporiza los disolventes, siendo su vapor conducido hacia la columna de rectificación. Los componentes más volátiles crean una corriente ascendente que se licua y se recupera en el condensador.

En el punto 11 del DVD adjunto se muestra información sobre una planta de regeneración de disolventes usados.

10.1. TRATAMIENTO DE DISOLVENTES CLORADOS LIGEROS

Los compuestos organoclorados ligeros, por ahora insustituibles en determinadas aplicaciones industriales, constituyen un problema medioambiental de primer orden. En la industria tienen diversas aplicaciones: desengrasantes, agentes extractores químicos, aditivos en pinturas y barnices, materias primas en síntesis de fármacos, pesticidas, etc.

También se ha comprobado que algunos de ellos, como el 1,1,1-tricloroetano, actúan sobre la capa de ozono. Sin embargo, el hecho de poseer unas determinadas características químicas y termodinámicas, que no sean inflamables, les confiere un valor muy especial, que los hace difícilmente sustituibles.

En resumen, los principales efectos de los disolventes organoclorados sobre el medio ambiente y los seres vivos son los siguientes:

- Contribuyen al *efecto invernadero* debido a la absorción de la radiación infrarroja. Algunos autores consideran que estos compuestos son responsables del 20% del calentamiento global del Planeta.
- Destruyen la *capa de ozono*: a causa de su estabilidad puede ascender hasta la estratosfera y reduce el ozono (O_3) a oxígeno molecular (O_2).
- Forman *smog* fotoquímico: la radiación solar cataliza reacciones de los compuestos organoclorados con otros gases, normalmente NO_x, formando ozono en las capas bajas de la atmósfera, que lo convierte en un contaminante secundario.
- Se consideran *tóxicos* y *bioacumulables*: este hecho es uno de sus aspectos más problemáticos.

Los tratamientos más habituales a los que se suele someter a los disolventes clorados ligeros son los siguientes:

- *Incineración.* Es el método más habitual, pero presenta ciertos problemas debido a que los átomos de cloro son retardantes de llama; al ser estos compuestos muy estables precisan temperaturas superiores a 1.200 ℃. Además, se pueden sintetizar otros compuestos todavía más tóxicos: fosgeno (Cl_2CO) o cloro molecular (Cl_2), según la reacción química siguiente:

$$\text{Compuesto clorado} + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O + Cl_2$$

- *Oxidación catalítica.* Se diferencia del anterior método en que la presencia de un catalizador (metales preciosos finamente divididos, en un soporte de alúmina o sílice) permite reducir las temperaturas de proceso hasta unos 400 ℃.
- *Hidrodecloración catalítica.* Consiste en la hidrogenación catalítica de los organoclorados. Este método se presenta como una tecnología emergente para el tratamiento de efluentes líquidos contaminados por compuestos clorados. Su aplicación permite la transformación de dichos contaminantes en los correspondientes compuestos sin cloro, que pueden posteriormente eliminarse mediante tratamientos biológicos convencionales. Permite operar a temperaturas del orden entre 200 y 300 ℃. Al trabajar sin oxígeno no pueden formarse productos tóxicos. La Figura 3.26 muestra el esquema de un proceso de hidrodecloración.

10.2. EXTRACCIÓN POR DISOLVENTES

La extracción por disolventes es una tecnología que ha sido aplicada con buenos resultados en el tratamiento de suelos, lodos, fangos y sedimentos por residuos orgánicos.

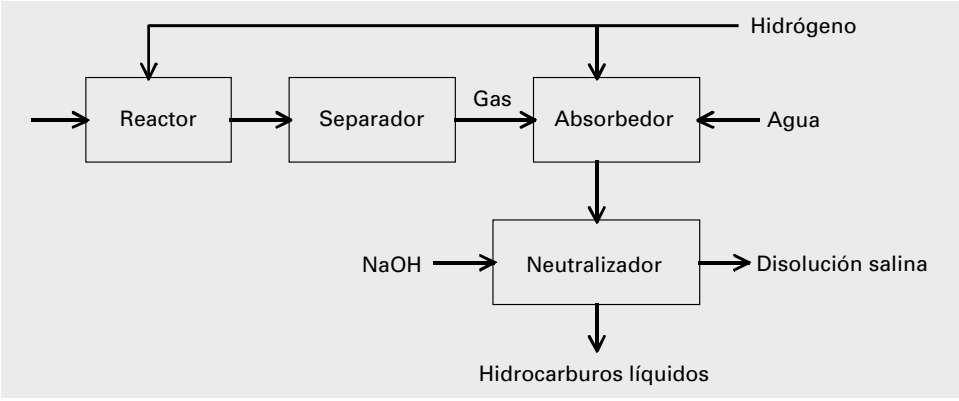


Figura 3.26. Representación esquemática de un proceso de hidrodecloración.

De hecho no es una tecnología terminal por si sola. La extracción no destruye los contaminantes, sino que los concentra de manera que su eliminación o tratamiento final sea mas económico.

El proceso de extracción puede ser clasificado en tres variantes en función de la naturaleza del disolvente usado:

- *Disolventes convencionales (alcoholes, alcanos, etc.)*. Se usan disolventes líquidos a temperatura y presión atmosférica.
- *Fluidos casi críticos/gases licuados*. Se emplean gases CO_2, butano, etc., que han sido previamente licuados.
- *Disolventes a temperatura crítica*. Emplea disolventes que tienen la propiedad de ser absolutamente miscibles con agua a una temperatura y que son inmiscibles en agua a otra temperatura. De esta manera se pueden separar los contaminantes de la fracción acuosa a esta temperatura.

11. Tratamiento de compuestos orgánicos volátiles

Los COV's, o compuestos orgánicos volátiles, se definen como «cualquier compuesto orgánico, que contenga carbono y participe en reacciones fotoquímicas atmosféricas, excluyendo CO, CO_2, ácido carbónico, carburos, carbonatos metálicos y carbonato de amonio». Pueden ser compuestos alifáticos o aromáticos, halogenados o no halogenados.

Los COV's se generan en un sinfín de actividades que van desde la fabricación y uso de disolventes para la aplicación de pinturas, hasta el manejo de carburantes para vehículos. Las principales fuentes de emisión de estos contaminantes son:

- Transporte y manejo de carburantes.
- Aplicación de pinturas, tintas, plásticos,...
- Tintorerías.
- Industria transformadora de metales y plásticos.
- Imprentas.
- Limpieza de superficies.
- Industria química en general.

Las producciones de COV's son importantes. Tan sólo en España, y en 2003, se calcula que la tasa de generación por persona y año es de 3,2 kg. La Figura 3.27 resume los costes de alguno de los procesos más usuales de tratamiento de compuestos orgánicos volátiles.

Debe señalarse que, en la actualidad, existe una potente industria de recuperación de disolventes para conseguir su plena reutilización con la misma finalidad para la que fueron fabricados. Por este motivo aparece en este texto como técnica de valorización. Los métodos convencionales de tratamiento de los COV's son los fisicoquímicos, a los que últimamente también se han añadido los biológicos. La Tabla 3.12 resume los principales métodos empleados.

En los métodos biológicos, el aire contaminado se alimenta al biorreactor donde una flora microbiana convierte los contaminantes en CO_2, H_2O y biomasa. Como sea que las reacciones microbianas deben desarrollarse en medio acuoso, el líquido puede ser el mismo lixiviado de una planta de compostaje.

11.1. SISTEMAS DE MINIMIZACIÓN DEL IMPACTO OLOROSO

La contaminación por olores esta causada por la emisión a la atmósfera por compuestos constituidos por

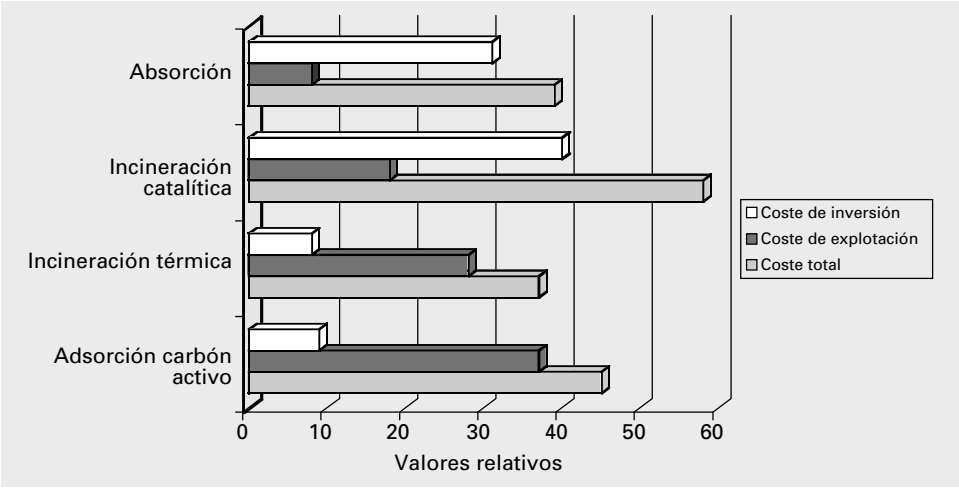


Figura 3.27. Coste de tratamiento de los COV's.

Tabla 3.12. Resumen de los métodos más habituales para el tratamiento de compuestos orgánicos volátiles

Método	Tecnología	Principio
Fisicoquímico	1. Absorción 2. Adsorción 3. Condensación 4. Incineración térmica 5. Incineración catalítica	1. Transferencia gas/líquido 2. Transferencia gas/sólido 3. Disminución isobárica de temperatura o aumento isotérmico de presión 4. Oxidación térmica (T > 1.000 °C) 5. Oxidación térmica (T < 1.000 °C)
Biológico	Biofiltración	Digestión bacteriana

compuestos orgánicos volátiles (disolventes), compuestos nitrogenados (aminas), compuestos de azufre (mercaptanos, ácido sulfhídrico), etc. Todo ello provoca molestias a la población cercana a gran cantidad de plantas de tratamiento, como pueden ser las depuradoras de aguas residuales urbanas.

Los objetivos de la contención, eliminación o confinamiento de los olores son:

- Prevenir el escape libre a la atmósfera.
- Minimizar el volumen de gas (aire con gas) a tratar.
- Instalar rigorosos sistemas de alarma y control ya que muchos de estos gases son letales.
- Llevar a cabo una inspección de seguridad y control.

En la biofiltración, los microorganismos captan y metabolizan directamente los compuestos gaseosos contaminantes que les sirven de nutrientes, expeliendo como producto de la digestión otros compuestos (CO_2 y H_2O, básicamente), inocuos para el medio ambiente.

El material biológico a utilizar (por ejemplo, compost o turba) debe estar húmedo. Se puede decir, entonces, que la biofiltración es un tipo de absorción de gases contaminantes en películas líquidas seguida de una transformación biológica, aunque también intervienen procesos de adsorción sobre sustancias sólidas (bacterias).

Los microorganismos se utilizan sobre un soporte natural, como por ejemplo, turba o corteza de árbol húmeda. La turba tiene la ventaja de ser un buen adsorbente de ciertos gases, por lo que la reacción se debe a un doble efecto:

- Adsorción del contaminante por la turba seguida de absorción en la superficie por las bacterias.
- Absorción directa por el líquido que humedece la turba, que también contiene bacterias.

La turba puede contener una biomasa natural de unos 10^7 microorganismos por gramo. De ahí la posibilidad de utilizar los biofiltros a escala industrial, como si fueran un conjunto de muchísimos microrreactores trabajando en paralelo, sin peligro para el medio ambiente.

Los biofiltros se emplean especialmente para filtrar cantidades pequeñas de compuestos contaminantes en grandes volúmenes de aire, por lo que se requieren grandes superficies, ya que las alturas de los filtros no son muy elevadas.

El gas contaminado se hace pasar por un lecho de turba de forma repartida, que disponga de una gran superficie y una altura suficiente (0,5 a 1,5 m). El gas atraviesa el lecho lentamente de abajo arriba y al final, ya depurado, se deja escapar a la atmósfera.

12. Tratamientos para la recuperación de metales

Los metales son los únicos constituyentes de los residuos que no pueden ser fácilmente transformados por métodos químicos o térmicos; por esta razón deben ser convertidos a su forma más insoluble posible, para evitar su reincorporación al medio ambiente. La dificultad y el coste del tratamiento necesario dependen de la forma en que se encuentra el metal en el residuo y de la cantidad presente.

En la Tabla 3.13 se presenta una lista de los metales que se consideran tóxicos según la legislación aplicable.

Tabla 3.13. Relación de metales considerados como tóxicos según la legislación aplicable

Metal	EE UU	UE	España	Cataluña
Antimonio (Sb)	Sí	Sí	Sí	Sí
Arsénico (As)	Sí	Sí	Sí	Sí
Bario (Ba)	Sí	Sí	Sí	Sí
Berilio (Be)	Sí	Sí	Sí	Sí
Boro (B)	No	No	Sí	No
Cadmio (Cd)	Sí	Sí	Sí	Sí
Cobalto (Co)	Sí	Sí	Sí	Sí
Cobre (Cu)	Sí	Sí	Sí	Sí
Cromo (Cr)	Sí	Sí	Sí	Sí
Estaño (Sn)	No	No	Sí	No
Mercurio (Hg)	Sí	Sí	Sí	Sí
Molibdeno (Mo)	Sí	No	Sí	No
Níquel (Ni)	Sí	Sí	Sí	Sí
Plata (Ag)	Sí	No	Sí	No
Plomo (Pb)	Sí	Sí	Sí	Sí
Selenio (Se)	Sí	Sí	Sí	Sí
Talio (Tl)	Sí	Sí	Sí	Sí
Telurio (Te)	No	Sí	Sí	Sí
Titanio (Ti)	No	No	Sí	No
Uranio (U)	No	No	Sí	No
Vanadio (Va)	Sí	Sí	Sí	Sí
Zinc (Zn)	Sí	Sí	Sí	Sí

Aparte de los sistemas habituales para la recuperación de los metales presentes en las corrientes residuales, como el intercambio iónico o los procesos de adsorción, se pueden citar los siguientes:

- *Evaporación y destilación.* Estos procesos sólo resultan rentables para residuos muy concentrados. El agua evaporada se condensa y posteriormente se reutiliza. La destilación y la evaporación suelen emplearse como tratamientos terminales en procesos de recuperación de metales. Así, suelen emplearse en la recuperación de Zn, Cu, Ni y Cr procedentes de efluentes galvánicos.
- *Métodos electroquímicos.* Esta técnica se basa en reacciones redox, donde los electrones liberados por la corriente eléctrica reducen los iones metálicos, obligándolos a depositarse en el cátodo de la célula electrolítica. Los procesos de oxidación y reducción son muy utilizados en los métodos de inertización en la industria de la minería, en operaciones de refino de metales y de tratamiento de superficies, para convertir metales de valencias no deseadas a otras que faciliten su precipitación.

Una alternativa a la recuperación de metales es la biominería, técnica basada en la utilización de bacterias que degraden los metales, evitando de esta forma el impacto ambiental causado por su presencia. El proceso de tratamiento de metales incluye la concentración de las especies de interés mediante un proceso de bioflotación, y una posterior recuperación de los elementos presentes mediante biolixiviación y biooxidación.

En la práctica la recuperación de metales queda limitada a aquéllos que tienen un mayor valor económico, como la plata y el níquel, y eventualmente el cobre.

- *Separación con membranas.* Consiste en hacer pasar el efluente residual a través de una membrana porosa (osmosis inversa o electrodiálisis) que deja pasar el agua pura, concentrando la disolución que contiene el metal; repitiendo este proceso reiteradas veces se pueden alcanzar concentraciones importantes. Esta técnica puede aplicarse en las industrias de tratamiento de superficies, ya que la progresiva reducción del precio de las membranas favorece su uso.
- *Técnicas de precipitación:* El mecanismo más importante de la fijación de los metales es su precipitación en forma de especies poco solubles. La precipitación química consiste en conseguir un sólido a partir de una disolución. Los reactivos precipitantes de los metales suelen ser

$Ca(OH)_2$, NaOH y Na_2CO_3; la precipitación con sulfuros es muy poco usual por su carácter tóxico; también en casos especiales se aplica la TMT (trimercaptotriazina). La presencia de agentes complejantes en el efluente, circunstancia frecuente en los residuos, hace disminuir considerablemente la eficacia de la precipitación. Como se ha comentado en otros apartados del texto, la coagulación es la desestabilización producida por la compresión de las dobles capas eléctricas que rodean a todas las partículas coloidales; por otra parte, la floculación se refiere a la desestabilización por la adsorción de polímeros orgánicos y la posterior formación de puentes partícula-polímero-partícula (flóculo).

12.1. SISTEMAS MICROBIOLÓGICOS PARA LA RECUPERACIÓN DE METALES

El proceso de acción bacteriológica sobre los lixiviados (*bioleaching*) también puede ser aplicado a la recuperación de metales contenidos en ciertos residuos sólidos, como cenizas y polvo fino de escorias de incineración. El principio de funcionamiento se basa en la afinidad de ciertos microorganismos (bacterias y hongos principalmente) para poder transformar determinados compuestos en sustancias desde donde sea fácil recuperar los metales. Las reacciones básicas de estos procesos son las siguientes:

- Reacciones redox.
- Formación de ácidos orgánicos o inorgánicos.
- Expulsión de agentes complejantes.

La Tabla 3.14 expone algunos ejemplos de microorganismos que, bajo ciertas condiciones de temperatura y pH, recuperan metales de determinados compuestos.

En cenizas volantes y escorias de incineradoras de RSU hay presentes ciertos metales, en particular aluminio y zinc, que se hallan en tal proporción que su recuperación resultaría rentable por un sistema como el expuesto anteriormente. En el caso de otros metales, como plata, níquel y zirconio, cuya recuperación resultaría prohibitiva mediante los sistemas convencionales, sí sería posible gracias a esta tecnología. La Figura 3.28 expone los resultados experimentales de la eficacia en el lixiviado de la bacteria *Thiobacillus thiooxidans*, microorganismo aerobio, únicamente capaz de oxidar azufre, que suele habitar en depósitos sulfurados desde donde resulta fácil aislarlos; se desarrolla entre 5 y 40 ℃, a un valor de pH óptimo de 2,5.

Tabla 3.14. Relación de microorganismos adecuados para el tratamiento de metales

Microorganismo	Metal lixiviado	Compuesto
Alternaria sp.	Fe	oxalato, melato
Aspergillus ficuum	Al, Li, Fe, Mn	oxalato
Bacillus sp.	Au, Mn	aminoácidos
Penicillium simplicissimus	Zn, Ni, Ti, Cr, Fe, Al	citrato, oxalato, gluconato
Penicillium sp.	Mn, Au, Ni, Ag, Co	tartrato, citrato, gluconato

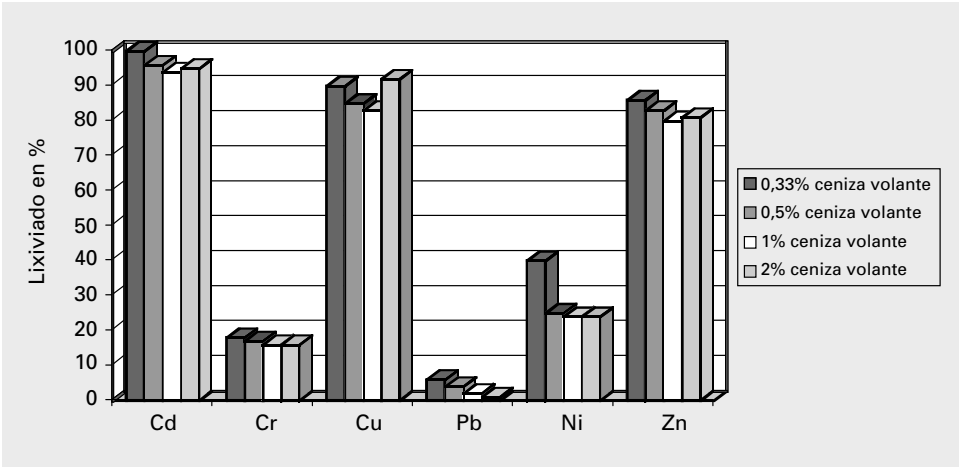


Figura 3.28. Eficacia de la bacteria *Thiobacillus thiooxidants*.

13. El compostaje. Proceso de tratamiento aerobio

El incremento en la generación de residuos orgánicos (RO) procedentes de actividades diversas, los problemas generados por una gestión deficiente, las nuevas directivas europeas sobre vertido y gestión de residuos, así como la relativa facilidad (económica y normativa) de que tengan como destino suelos de distintos tipos han provocado que en la actualidad haya un relativo interés por los tratamientos biológicos como el compostaje. Los objetivos básicos de este proceso son reducir el daño potencial de los residuos para el medio ambiente, recuperar las sustancias de valor, y generar un producto final útil. El compostaje emplea una gran parte de la fracción orgánica de los RSU, reduciendo el proceso de biodegradación en vertederos, produciendo menos gases y lixiviados.

El compostaje es una técnica de estabilización de la que existen múltiples definiciones, aunque muchas de ellas incompletas:

- Descomposición biológica y estabilización de sustratos orgánicos en las condiciones que permiten el desarrollo de temperaturas termófilas, resultado de una generación de energía calorífica de origen biológico, de la que se obtiene un producto final suficientemente estable para el almacenamiento y la utilización en los suelos sin impactos negativos sobre el entorno.
- Técnica de estabilización y tratamiento de residuos orgánicos biodegradables, dirigida con prioridad a sólidos y semisólidos; destruye, por temperatura, gérmenes y parásitos, vectores de enfermedades y semillas de malas hierbas.
- Es el resultado de una actividad microbiológica compleja a partir de unas condiciones particulares, que puede considerarse como biotecnología: «explotación industrial del potencial de los microorganismos, de las células vegetales o animales, y de los residuos que producen».
- Es un proceso basado en una actividad biológica gracias a que una fase sólida orgánica que sirve de soporte físico y de matriz de intercambio de gases, que facilita los nutrientes orgánicos e inorgánicos y aporta microorganismos endógenos, y que recoge los residuos metabólicos generados, actuando como aislante térmico.

El compostaje consiste en mineralizar mediante un proceso aerobio parte de la materia orgánica presente en los residuos, eliminando así su toxicidad, y transformándola en un producto nutritivo para actividades agrícolas. En esencia, y como se indica en la Figura 3.29, los microorganismos en combinación con el calor consiguen reducir la humedad inicial del RSU, mineralizar buena parte de la materia orgánica, darle un aspecto esponjoso y, sobre todo, eliminar los gérmenes patógenos. La aplicación de RO al suelo, que nunca debe convertirse en un vertido encubierto, presenta ventajas e inconvenientes que muchas veces no se analizan correctamente debido a los distintos intereses de los generadores y de los usuarios y a las repercusiones sobre el aceptor final, el suelo, y sobre sus atributos y funciones.

El suelo, recurso natural no renovable a corto plazo, es un sistema vivo y complejo que evoluciona

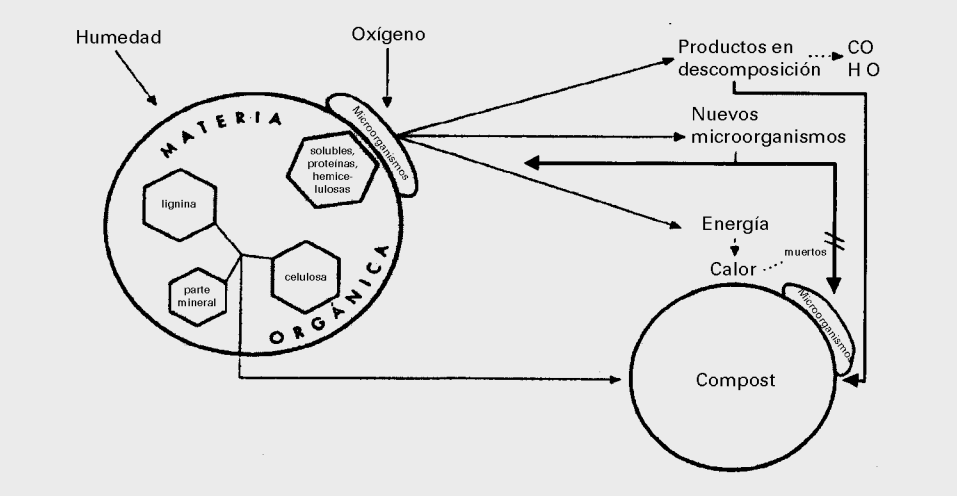


Figura 3.29. Esquema básico del proceso de compostaje.

con el tiempo. Tanto su formación y evolución como su degradación son el resultado de la cinética de procesos que dependen de atributos intrínsecos y extrínsecos. Los primeros obedecen a los factores que participan en su formación ~~nat~~uraleza del material originario, clima, topografía, vegetación natural y tiempo ~~y~~ determinan la capacidad de un suelo para un uso específico. Los atributos extrínsecos están sujetos al uso del suelo y a su gestión o manejo.

En referencia a las ventajas de la aplicación de residuos orgánicos al suelo y a la producción vegetal, se deben tener en cuenta el contenido en macro y micronutrientes, y la aportación de materia orgánica; algunas desventajas podrían ser la posibilidad de aportar contaminantes de distintos tipos, generar olores desagradables, nutrientes no equilibrados, dificultades para dosificar correctamente, así como el desconocimiento de las condiciones de uso. El compostaje como sistema de tratamiento de RO tiene sentido si de su aplicación se obtienen ventajas claras sobre la gestión y posible destino del producto. En este apartado se pretende dejar claros ciertos conceptos relacionados con el compostaje y la gestión de los residuos orgánicos, aplicándolos al caso particular de los fangos resultantes del tratamiento de aguas residuales industriales.

En la gestión de los residuos orgánicos generados por diversas actividades debe tenerse en cuenta su composición, las cantidades generadas y periodicidad, así como los condicionantes y las ventajas de los distintos tipos de gestión. La mayoría de residuos orgánicos pueden caracterizarse por unos contenidos elevados en agua y materia fermentable que dificultan su transporte y almacenamiento, pero que, a su vez, pueden contener según su origen distintos tipos de contaminantes. Es aconsejable conocer bien sus componentes y las transformaciones que pueden sufrir según el manejo y la gestión a que se vean sometidos.

En la Tabla 3.15 se indican algunas características de distintos tipos de RO y se comenta someramente la relación de éstas con su posible gestión. El producto resultante del proceso de compostaje (compost) es el resultado de la estabilización de la materia orgánica que ha sido transformada en un producto parecido a las sustancias húmicas del suelo, libre de patógenos, que no atrae insectos, que puede ser almacenada sin ocasionar problemas, y que es beneficiosa para el suelo además de favorecer conveniente el crecimiento de las plantas. El compost puede ayudar a controlar las enfermedades de las plantas, además de prevenir la disminución de los niveles de materia orgánica del suelo, contribuyendo a la formación de una fracción orgánica estable que impida la eliminación del carbono. El compost crea un depósito potencial de carbono, además de incorporar nutrientes al suelo.

Tabla 3.15. Características de residuos orgánicos de distintos orígenes (datos propios expresados sobre materia seca). (1) GE: grado de estabilidad de la materia orgánica que contiene el producto; valores más elevados indican mayor resistencia a la degradación biológica; (2) nd: no determinado.

	Fangos de papelera		Residuos varios IAA			Residuos ganaderos		Fracción orgánica RM recogida selectiva	Fracción orgánica RM separada en planta	Restos vegetales jardinería	Residuo industria farmacéutica
						EDA1	EDA2				
pH	7,78	7,63	5,06	5,96	7,49	8.64	8.95	5,40	5,80	6,60	8,39
CE (dS/m)	0,22	0,26	8,35	0,29	0,43	4.55	7.64	3,50	6,60	2,00	1,62
% Humedad	52,51	66,51	12,34	36,75	55,53	84.9	67.11	70,70	48,42	29,66	71,16
% SVT	24,41	42,20	85,43	98,71	91,80	77.87	57.28	75,40	51,39	74,43	79,22
% N	0,24	0,52	6,26	3,63	2,99	3.31	2.55	2,54	1,60	1,21	5,82
C/N	43,87	40,21	7,19	12,18	17,93	13,00	11,00	16,10	16,00	34,00	6,64
% GE[1]	24,91	39,75	25,49	44,13	64,80	26.43	35.55	nd[2]	nd	nd	45,94
% P2O5	0,09	0,09	0,81	0,23	0,75	1,67	2,35	0,92	0,71	0,31	0,58
% K2O	0,10	0,14	6,37	0,10	2,50	3,76	4,91	3,12	1,12	1,54	2,34
% Ca	16,43	3,02	0,60	0,14	1,29	2,59	3,63	4,00	2,59	2,96	2,07
% Mg	0,38	0,45	0,21	0,06	0,16	0,73	0,87	0,50	0,53	0,44	0,47
% Na	0,57	0,06	0,11	0,12	0,02	0.40	0,36	0,91	0.71	0,39	0,17
% Fe	0,11	0,22	0,05	0,02	0,10	0,39	0,32	0,32	1,01	0,07	0,48

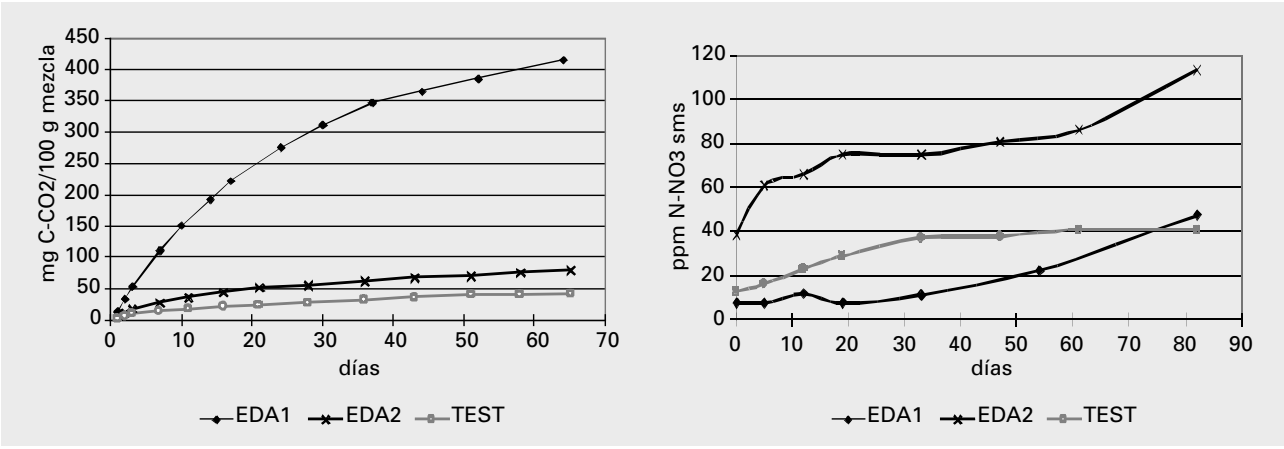


Figura 3.30. Comportamiento de residuos con distinto grado de estabilidad respecto a la mineralización de la materia orgánica y del nitrógeno.

Independientemente de su contenido en contaminantes, que no se han incluido en la Tabla 3.15, es evidente que la variabilidad en el contenido en materia orgánica (MO) y nutrientes es elevada; por tanto, su comportamiento en el almacenamiento, transporte o posible uso y/o tratamiento será también variado. En la Figura 3.30 se muestra, para los residuos ganaderos incluidos en la Tabla 3.15, el comportamiento en incubaciones realizadas con mezclas con suelos agrícolas. El residuo ganadero que muestra mayor estabilidad (EDA2) manifiesta una menor velocidad en la mineralización de su materia orgánica que se manifiesta por un menor desprendimiento de CO_2. El residuo ganadero menos estable (EDA1) presenta una descomposición rápida, y un incremento de la actividad biológica, que provoca una fuerte inmovilización del nitrógeno que contiene.

Deben tenerse en cuenta estas características y el contenido en contaminantes para decidir cual es el tipo de gestión más adecuada. En caso de pretender una aplicación agrícola, por ser más económica, es importante conocer el tipo de problemas que puedan generar en una aplicación directa y las ventajas que pueda conllevar un tratamiento de estabilización biológica como el compostaje.

13.1. FABRICACIÓN DE COMPOST

Cuando los residuos llegan a las instalaciones son pesados y seguidamente se les somete a las siguientes etapas:

- Tamizaje y trituración, para reventar los envoltorios y desfibrar, en lo posible, los productos fibrosos.
- Introducción en la zona de compostaje. Los túneles y pilas pueden tener hasta 2,5 metros de altura, según el proceso ilustrado en la Figura 3.31.
- Aireación y volteo; esta operación permite la mezcla y la aireación del material.
- Cribado. Esta operación se realiza fuera de las pilas de volteo, en un tromel.

A la hora de fabricar compost se pueden plantear dos posibilidades: gestionar una serie de residuos orgánicos mediante un proceso de compostaje, u obtener un compost con unas determinadas características, para lo que resulta necesario unos materiales de partida concretos. Si se dispone de un residuo orgánico al que se considera necesario compostar como único método de gestión y poder darle un destino agrícola, es necesario controlar la cantidad y su variabilidad con el tiempo, para determinar si cumple las condiciones necesarias para poder ser compostado correctamente.

Durante el proceso es preciso controlar la humedad y la temperatura del material: si la humedad se reduce se debe añadir agua. La temperatura suele oscilar entre 50 y 75 ℃. También es necesario controlar la presencia de microorganismos y la capacidad para mantener un equilibrio entre aire y agua; si no fuese así se deberían buscar los materiales de características complementarias para corregir las deficiencias. Puede optarse por un proceso más o menos largo, así como por la obtención de un producto final más o menos estable. En cualquier caso se obtendrá un compost que podrá tener su campo de aplicación en función de sus características.

Las características de un residuo orgánico han de permitir que el proceso de compostaje se lleve a cabo sin problemas, pero asegurando, a su vez, que el

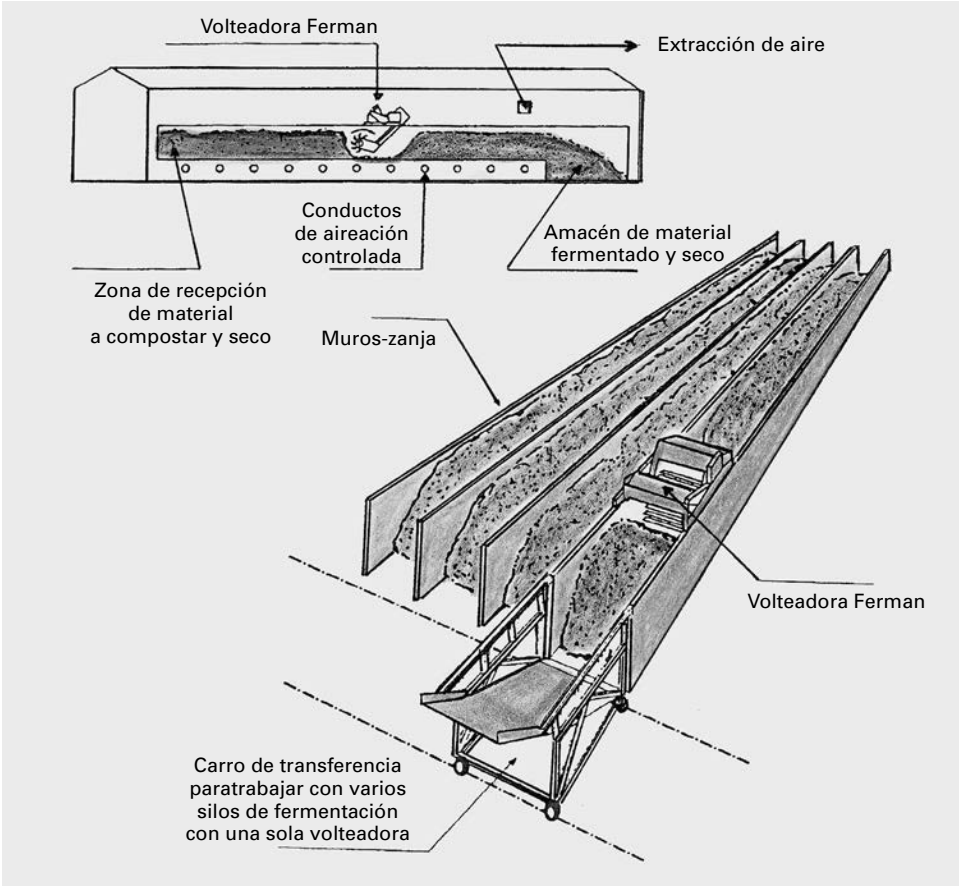


Figura 3.31. Sistema convencional de fabricación de compost en túneles abiertos.

compost obtenido cumplirá con unos ciertos requisitos de calidad: aspecto y olor aceptable, higienización correcta, bajo nivel de impurezas, composición constante, etc. El ciclo del proceso de compostaje total puede durar hasta ocho semanas.

De cualquier forma, e independientemente de su aplicación, a partir de la fracción fermentable de los residuos sólidos urbanos, separados selectivamente, se puede diseñar un buen compost con la siguiente proporción:

- 1/3 de RSU seleccionado.
- 1/3 de residuos leñosos: para proporcionar porosidad.
- 1/3 de residuos de poda y restos de hortalizas: materiales de rápida fermentación que aceleran el proceso de compostaje.

13.2. FASES DEL PROCESO DE COMPOSTAJE

El compostaje se desarrolla en dos fases (descomposición y maduración) que deben diferenciarse claramente y tenerse en cuenta en el diseño de una planta de tratamiento por sencilla que sea, estableciendo, para cada una de ellas, dinámicas de control adecuadas, tal y como se indica en la Figura 3.32.

La fase de descomposición puede dividirse en tres etapas:

- Una inicial mesofílica, durante la cual diversas familias de microorganismos inician la descomposición de los compuestos fácilmente degradables, provocando un incremento de la temperatura y en la que el pH desciende debido a la formación de ácidos orgánicos.
- Durante la segunda etapa termofílica, van apareciendo los microorganismos termofílicos y la temperatura supera los 40 ℃; al alcanzar 60 ℃ los hongos se inactivan y la descomposición es llevada a cabo por actinomicetos y bacterias formadoras de esporas. Las sustancias fácilmente degradables, como azúcares, grasa, almidón y proteínas, son rápidamente consumidas y la mayoría de patógenos humanos y vegetales son destruidos. El pH aumenta a medida que las proteínas liberan amoníaco, mientras que la celulosa y las ligninas son parcialmente alteradas.

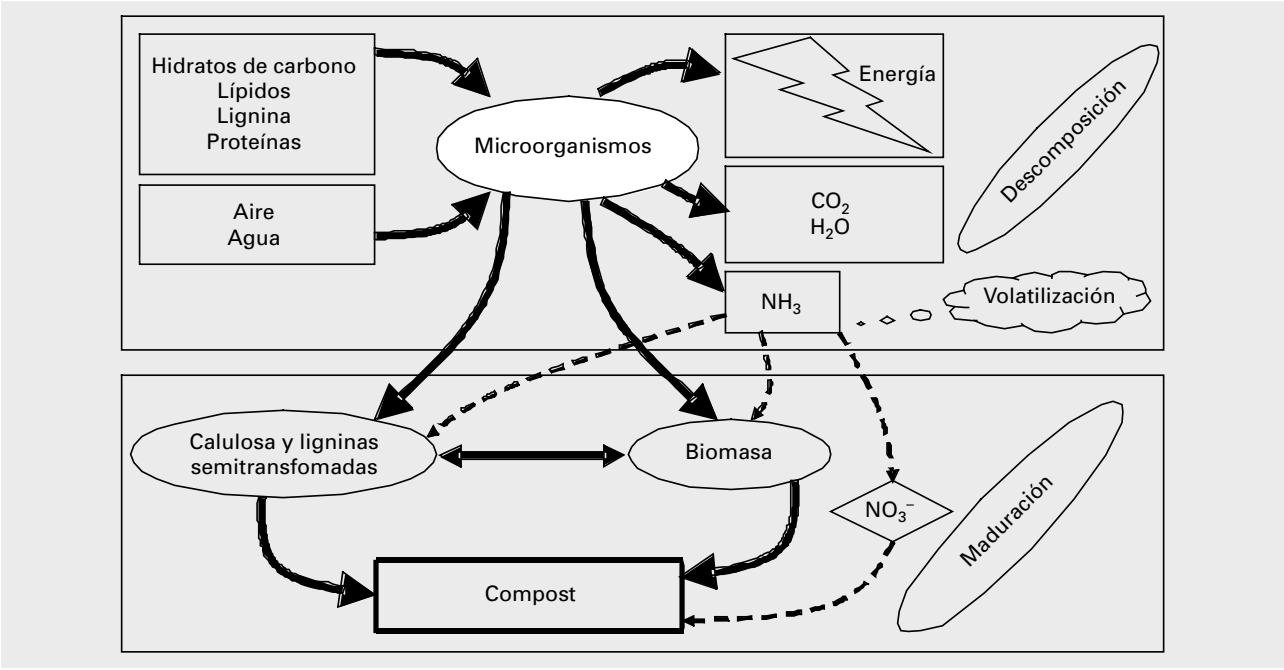


Figura 3.32. Fases del proceso de compostaje.

- En la tercera etapa, la temperatura empieza a disminuir; los hongos termofílicos reinvaden el material a comportar, y la celulosa y la hemicelulosa siguen sufriendo cierta transformación. La fase de descomposición es la más exigente del proceso y el no realizarla adecuadamente condiciona la continuación del proceso, la aparición de problemas de lixiviados y malos olores, y pérdidas de amoníaco, además de influir en la calidad del producto final.

La maduración depende del tipo de material que se ha tratado, pero su duración y las condiciones en que se deba llevar a cabo dependerán mucho del destino final del producto (en particular en el caso de fabricación de sustratos) y cómo se hayan desarrollado las etapas anteriores. Requiere desde pocas semanas hasta varios meses; en ella se genera mucho menos calor y el pH se mantiene ligeramente alcalino. En esta fase los microorganismos mesófilos, al igual que diversos tipos de microfauna, colonizan el compost medio maduro. Se genera una intensa competición por los alimentos, formación de antibióticos y aparición de antagonismos, obteniéndose al final un producto más o menos estable según la duración de la última fase.

El compostaje, a pesar de ser un tratamiento de fundamento sencillo, debe controlarse como cualquier proceso de fabricación de un producto; si se tratan materiales con características no adecuadas y no se controla el proceso aparecerán problemas durante su desarrollo y también con la calidad del producto final, y, por tanto, en la distribución y comercialización.

De hecho, los condicionantes del proceso se refieren a aquéllos que afectan a los «actores principales»: bacterias, hongos y actinomicetos, a los que en el diseño de una planta de tratamiento se les tiene que facilitar las condiciones de trabajo. Estos condicionantes biológicos junto con los físicos (transferencia de masa y energía) son los principios básicos que gobiernan el proceso: tipo de residuos a mezclar, relación C/N, proporción en biopolímeros, humedad inicial, tamaño partícula, equipo de mezcla, sistema de descomposición, maquinaria de volteo, frecuencia de volteos, temperatura, control de la humedad, de la aireación y de las condiciones ambientales, recirculación de aire, tiempo de descomposición, sistema de maduración, tiempo de maduración y cribado.

Los materiales a compostar han de presentar por si solos o mezclados unas características que favorezcan y faciliten el proceso para realizarlo en las mejores condiciones energéticas, económicas y ambientales posibles. En la aceptación de un residuo en las plantas de compostaje debe tenerse en cuenta la biodegradabilidad, la compatibilidad con todas las operaciones del proceso, la seguridad ambiental y la influencia en la calidad del compost. Si en la Directiva del Consejo de la Unión Europea relativa al vertido de residuos ya se indica que *«queda prohibi-*

da la dilución o mezcla de residuos realizada sólo para cumplir los criterios de admisión», con más razón debería haber determinados tipos de limitaciones en el caso del compostaje.

En el punto 12 del DVD adjunto se muestra información complementaria sobre sistemas de producción de compost. Además se incluye un video sobre la fabricación y detalles de la maquinaria.

13.3. TRATAMIENTO DE LAS SUSTANCIAS PATÓGENAS PRESENTES EN LOS RSU

Los residuos sólidos urbanos, por su origen y composición, contienen organismos patógenos y parásitos que pueden ocasionar enfermedades infecciosas o incluso generar toxicidad a los seres vivos. Durante el proceso de tratamiento, tanto de RSU como de fangos de EDAR, tiene lugar una disminución de la cantidad de organismos patógenos. Para ello la USEPA (*United State Environmental Protection Agency*) propone unas condiciones mínimas para la higienización del proceso, descritas en las Tablas 3.16 y 3.17. La primera tabla expone los procesos que reducen los organismos patógenos más intensamente.

Tabla 3.16. Procesos empleados para la reducción de organismos patógenos

Proceso	Condiciones
Digestión aerobia	40-60 días; 15-20 °C
Secado al aire	3 meses
Digestión anaerobia	15 días (35-55 °C); 60 días (20 °C)
Compostaje (cualquier sistema)	5 días (T > 40 °C); 4 horas (T > 55 °C)

Tabla 3.17. Procesos que reducen los organismos patógenos más intensamente

Proceso	Condiciones
Compostaje en reactores	3 días; T > 55 °C
Compostaje en pilas	15 días; T > 55 °C
Secado con aire caliente (humedad <10%)	T > 80 °C
Tratamiento térmico	30 min; T > 180 °C
Digestión aerobia termófila	10 días; 55-60 °C
Radiación β	radiación > 1Mrad
Radiación γ	radiación > 1Mrad
Pasteurización	30 min; T > 70 °C

Además, junto a los residuos sólidos urbanos se hallan diversas sustancias tóxicas asociadas a productos de limpieza e higiene, medicamentos, desinfectantes, insecticidas, productos fitosanitarios, etc. Muchos de estos productos son estables, poco solubles en agua y difícilmente biodegradables. El hecho de que muchos de ellos sean liposolubles condiciona su persistencia en la cadena trófica.

Su comportamiento en el suelo, una vez transformado en compost, depende tanto de la molécula (tamaño, solubilidad, polaridad, propiedades fisicoquímicas, etc.), como de las características del medio (luz, pH, temperatura, humedad, contenido en materia orgánica y arcilla, población microbiana, etc.). Llevando a cabo un correcto proceso de compostaje existen posibilidades reales de reciclaje; sin embargo, es preciso observar algunas normas para la aplicación del compost a la agricultura, como la presencia de metales pesados y el destino del cultivo, es decir, si va destinado a alimentación humana o animal.

En otras aplicaciones no existen, lógicamente, tantas restricciones; estos serían los casos de aplicaciones en jardinería, paisajismo, restauración de espacios degradados y reconstrucción de áreas afectadas por grandes obras públicas, extracción de áridos, canteras, minería, etc. En estos ámbitos, la preparación del terreno para la posterior implantación de cubiertas vegetales, mediante siembras y plantaciones que impidan o minimicen la erosión, requiere el aporte al suelo de materia orgánica y fertilizantes que pueden ser suministrados por los RSU en muchos casos.

También es interesante señalar la posible derivación de los residuos sólidos urbanos, una vez transformados en compost, a los planes de reforestación tanto de superficies quemadas como de tierras de cultivo abandonadas. En este sentido, el compostaje puede considerarse tanto una técnica de inertización como de reciclaje.

13.4. HIGIENIZACIÓN DEL COMPOST

Tanto el compostaje en pilas como en túneles, como el esquematizado en la Figura 3.33, persiguen una fermentación que se caracteriza por una serie de reacciones exotérmicas que conducen a un aumento de temperatura.

Como muestra la Figura 3.34, el incremento de la temperatura a lo largo de las diversas etapas del proceso de compostaje se emplea para la higienización del propio compost.

La Tabla 3.18 expone las principales características del compost en sus diversas fases de elaboración.

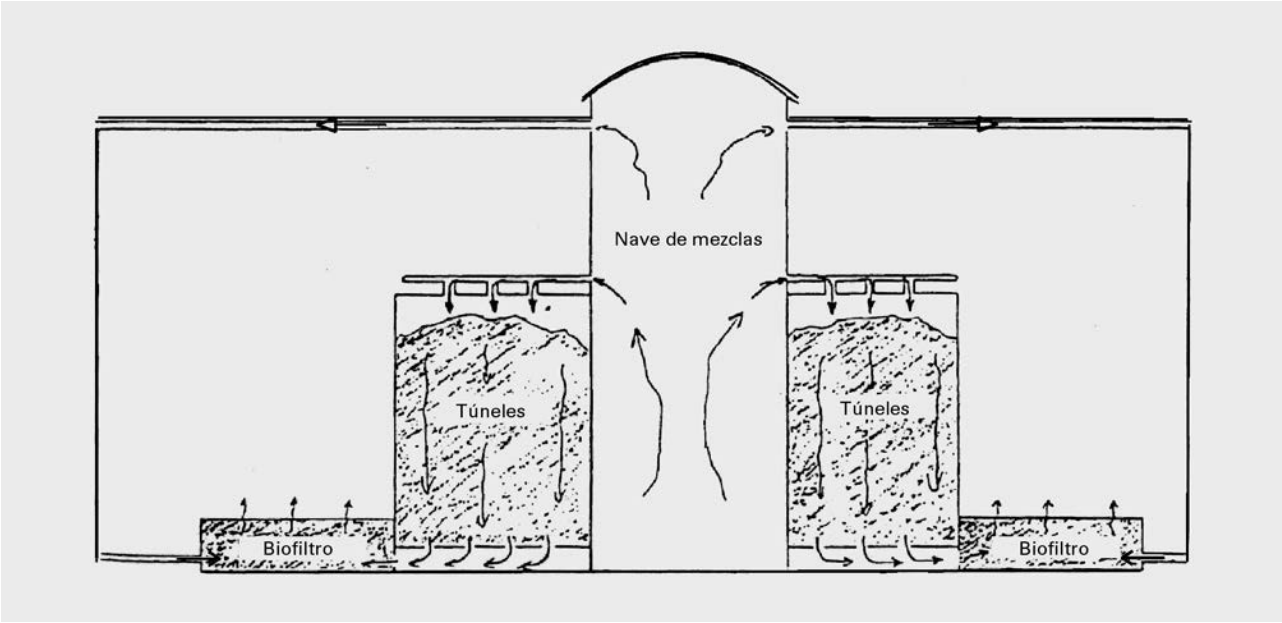


Figura 3.33. Esquema de la fabricación de compost en túneles.

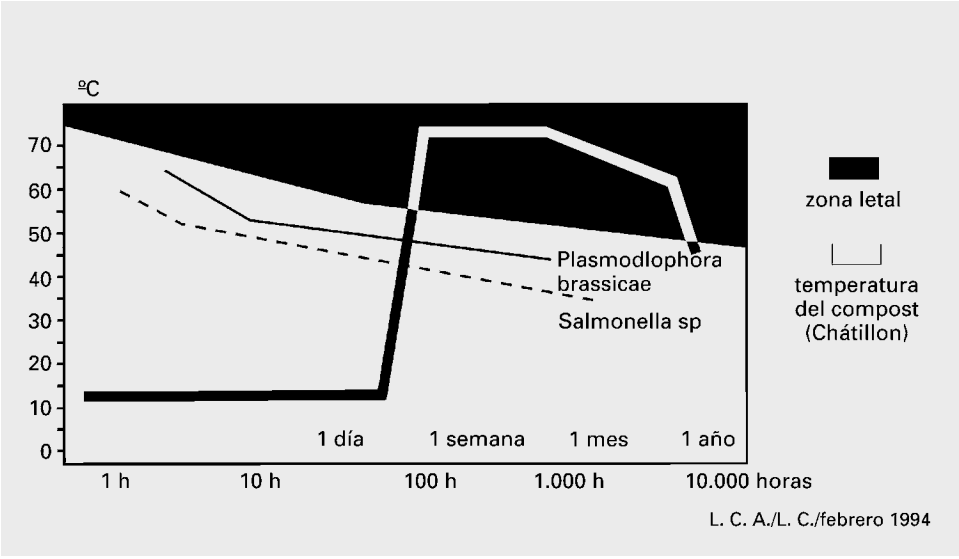


Figura 3.34. Variación de la temperatura durante el compostaje.

Tabla 3.18. Evolución de las características químicas en función del tipo de compost.

	Compost fresco	Compost bruto	Compost fino	Compost grueso
Tamizado con malla (mm)	-	0-80	0-10	10-40
Agua (%)	59,0	38,0	36,0	41,9
Materia orgánica (%)	66,3	49,0	47,2	75
C/N	28,7	20,0	14,3	27,0
NO_3/NH_4	0,03	1,53	1,60	1,56
Nitrógeno Kjeldahl	1,44	1,60	1,78	1,54

13.5. MATERIALES OBTENIDOS A PARTIR DEL TRATAMIENTO MEDIANTE COMPOSTAJE DE RSU: ABONO, ENMIENDA ORGÁNICA Y SUSTRATO

El valor agronómico del compost, que reside en su contenido en materia orgánica e inorgánica y en las propiedades que de ello derivan, dependerá en cada caso del origen del material de partida y de los tratamientos a que haya sido sometido. Por otro lado, su uso principal vendrá determinado por el objetivo final de su aplicación:

- Poner nutrientes a disposición de los cultivos: abono.
- Aumentar el nivel de humus del suelo: enmienda orgánica.
- Utilizarlo como soporte, total o parcial, de los cultivos: sustrato.

El valor de la aplicación de la fracción orgánica (FO) de los residuos sólidos urbanos en actividades agrícolas puede resumirse en:

- La fracción fermentable de los residuos sólidos orgánicos puede considerarse como abono de origen orgánico de baja graduación, con una importante carga de nitrógeno de lenta mineralización. El valor nutriente de los RSU no debe circunscribirse al contenido de los tres elementos más importantes: nitrógeno, fósforo y potasio, sino que debe valorarse la aportación de micronutrientes. Un complemento a la estructura orgánica del compost resultante consiste en la adición de estiércol.
- La aplicación de la FO de RSU también se contempla como una vía para la incorporación de humus (si éste no se renueva, el existente se va mineralizando y el suelo pierde su valor nutritivo), cuando el estiércol disponible es reducido.
- Aunque el proceso de obtención de compost, ya sea procedente de la FO de RSU o de fangos, haya sido correcto su utilidad como sustrato implicará casi siempre su mezcla con otros materiales, generalmente turba, cortezas selvícolas, etc., para que las propiedades sean las exigidas. El producto final suele tener entre un 20% y un 50% de RSU.

En el empleo de compost de RSU como sustrato es muy importante la selección de los RSU, para evitar la inserción de papeles, vidrios, plásticos, etc., al producto final. La Figura 3.35 reproduce el proceso de generación de compost a partir de RSU.

13.6. APLICACIÓN DEL COMPOSTAJE A LOS FANGOS RESULTANTES DE LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES

Los fangos tienen una composición y unas características físicas poco adecuadas para el compostaje, ya que presentan elevados contenidos en agua y nitrógeno y son muy pastosos. Por ello, deben mezclarse con otros materiales de características complementarias para conseguir:

- Menor contenido en humedad y nitrógeno.
- Mejor estructura.
- Relación C/N equilibrada.
- Proporción adecuada en biopolímeros.

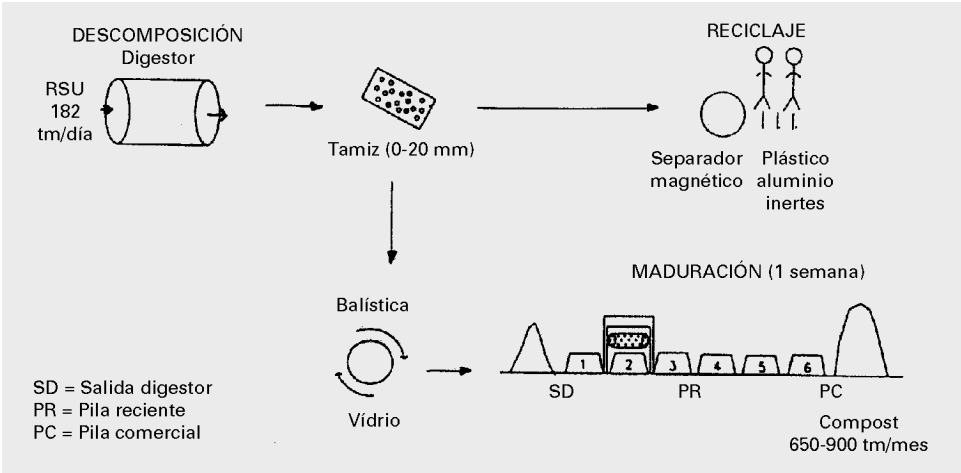


Figura 3.35. Esquema tradicional de producción de compost a partir de RSU.

Es aconsejable mezclarlos con materiales residuales ricos en celulosa y ligninas. En algunas plantas se mezcla con grandes trozos de madera que, aunque dan una relación C/N teóricamente correcta, no lo es en la práctica debido a que en realidad el carbono que contienen no es asimilable, presentando cierta dificultad en ser atacado por microorganismos, por lo que la relación C/N real es mucho menor; esto provoca fuertes desprendimientos de amoníaco y una incompleta transformación de la mezcla. El producto obtenido puede tener ciertos usos pero no se le puede considerar un material bien estabilizado.

En otros casos los fangos se mezclan con aserrín u otros restos carbonados de tamaño de partícula muy pequeño; en este caso la mezcla equilibra bien el contenido en agua y la relación C/N, pero carece de la suficiente aireación y pueden crearse problemas de anaerobiosis. La Tabla 3.19 presenta las características de distintos lodos resultantes de la depuración de aguas residuales de las industrias agroalimentarias (IAA).

Los materiales carbonados tienen tres funciones: constituyentes de los materiales celulares, participantes activos en el metabolismo energético y , a su vez, ya que muchos de los materiales que lo contienen son ricos en celulosas y ligninas presentan unas características importantes como estructurantes y como base de la formación de moléculas estabilizadas parecidas a las sustancias húmicas. Por esta razón es conveniente controlar, a la vez, el equilibrio de biopolímeros y la relación C/N[1], conociendo el grado de resistencia (GE) a la degradación que presentan, para ajustar la nutrición de los microorganismos y dar las condiciones físicas y fisicoquímicas necesarias en la matriz; así se puede evitar la generación de malos olores y lixiviados, la pérdida de nitrógeno y mejorar las características del producto final.

Tabla 3.19. Características de distintos lodos resultantes de la depuración de aguas residuales procedentes de industrias agroalimentarias

	Industria cervecera		Lodo industria zumo frutas	IAA	Industria vinícola	Industria lechera		Matadero
pH	6,85	7,98	7,65	5,67	7,35	12,10	5,85	6,70
CE (dS/m)	0,77	1,42	0,78	0,98	0,61	6,99	1,94	5,03
% H	89,95	75,82	85,26	84,97	88,38	61,88	80,96	82,43
% SVT	68,04	33,77	83,18	89,44	20,75	27,06	80,57	74,76
% N total	9,04	2,58	10,53	4,45	1,10	3,04	7,70	6,00
C/N	4	8	4	10	9	4	5	6
% GE	15,3	16,3	28,5	58,6	33,6	4,70	15,5	39,2
% P2O5	1,34	1,29	0,36	0,42	2,21	0,76	2,09	1,61
% K2O	0,46	0,07	0,24	0,19	1,75	0,12	0,32	0,23
% Ca	3,20	14,02	2,72	0,62	9,70	18,80	2,92	2,86
% Mg	1,73	0,91	0,28	0,12	0,40	0,46	0,17	0,23
% Na	0,03	0,50	0,70	0,29	0,26	0,13	0,7	0,18
% Fe	0,28	0,11	0,42	0,93	0,85	2,02	0,36	5,18
ppm Zn	210	195	454	51	321	151	454	470
ppm Mn	70	54	58	73	124	57	27	161
ppm Cu	54	39	69	65	1.342	20	20	387
ppm Cd	<1	<< 1	< 1	< 1	<1	<1	<1	< 1
ppm Cr	32	25	27	13	41	39	28	25
ppm Pb	33	20	10	8	48	4	10	46

[1] En ciertos co-compostajes es un error hablar de que los restos vegetales actúan solamente como estructurante; siempre debe tenerse en cuenta que han de aportar carbono (materiales de composición y tamaño que favorezcan la descomposición) y estructura (podrían ser sustituidos por cualquier material que sin ser problemático para el proceso y el producto final permitiese una autoaireación del material a comportar).

En la Tabla 3.19 aparece la composición de distintos fangos resultantes de la depuración de aguas residuales procedentes de la industria agroalimentaria, que muestran también gran variabilidad, incluso los procedentes de actividades del mismo tipo (se han sombreado aquellos valores que se deben tener más en cuenta al decidir el tipo de gestión). En general se caracterizan por tener contenidos elevados en MO y nitrógeno que aunque les dan un valor como posibles abonos orgánicos, aconsejan no aplicarlos directamente al suelo para evitar fermentaciones indeseadas y liberación rápida de nitrógeno. Su contenido en metales pesados acostumbra ser bajo y permitiría su aplicación al suelo. Al no poderse aplicar al suelo directamente se aconsejaría su compostaje pero asegurándose una buena mezcla con materiales de características complementarias como se ha indicado anteriormente.

En la Tabla 3.20 se da la composición de otros tipos de fangos procedentes de industrias no agroalimentarias. Los fangos 1 y 2 no tendría sentido aplicarlos al suelo o compostarlos por su bajo contenido en MO y el fango 3 no sería aconsejable por su elevado contenido en metales, que en caso de ser compostado se incrementarían relativamente y por tanto, sólo podría tener como destino el vertedero, previo pretratamiento.

La utilización de fangos en agricultura se regula por la Directiva 86/278/CEE transpuesta a la legislación española mediante el RD1310/1990. Las limitaciones vienen impuestas principalmente por el contenido en metales pesados del suelo y del fango. Desde el año 2000 se está trabajando en un nuevo documento europeo que remplace la directiva 86/278, pero que aún no ha entrado en vigor. En esta nueva propuesta se consideran, además de los metales pesados, otros aspectos como el contenido en contaminantes orgánicos y la relación de metales respecto el contenido en fósforo. Así también, establece períodos a medio y largo plazo para reducir el contenido en metales de los fangos (Tabla 3.21).

Tabla 3.20. Características de tres fangos industriales

	1	2	3
pH	7,61	11,80	8,4
CE (dS/m)	0,84	6,25	3,26
% humedad	70,78	52,66	68,9
% SVT	22,29	24,43	60,64
% N total	0,20	1,53	1,59
C/N	70	8	19
% GE	31,00	38,00	44,00
% P_2O_5	0,39	0,70	0,65
% K_2O	0,04	0,12	0,14
% Ca	10,49	16,00	8,9
% Mg	0,77	2,12	1,52
% Na	0,38	0,26	0,12
% Fe	2,01	3,05	2,39
ppm Zn	203	950	4300
ppm Mn	588	700	950
ppm Cu	63	556	3420
ppm Cd	3	6	9
ppm Cr	159	340	1200
ppm Pb	58	80	120

Tabla 3.21. Comparación de los contenidos en metales permitidos en suelos donde aplicar fangos según la Directiva 86/278/CEE y una propuesta en discusión de la UE. (En las dos primeras columnas los contenidos en metales presentan valores distintos según si el suelo donde se aplica es ácido o básico)

	Suelo (mg kg^{-1})		Fango (mg kg^{-1})			Acumulación en 10 años (kg ha^{-1} $año^{-1}$)	
	Directiva 86/278/CEE	*Working Doc. on sludge* (2000)	Directiva 86/278/CEE	2015 (mg kg^{-1})	2025 (mg kg^{-1})	Directiva 86/278/CEE	*Working Doc. on sludge* (2000)
Cd	1-3	0,5-1,5	20-40	5	2	0,15	0,03
Cu	50-140	20-100	1000-1750	800	600	12,00	3
Cr	—	30-100	—	800	600	—	3
Hg	1-1.5	0,1-1	16-25	5	2	0,10	0,03
Ní	30-75	15-70	300-400	200	100	3,00	0,9
Pb	50-300	70-100	750-1200	500	200	15,00	2,25
Zn	150-300	60-200	2500-4000	2000	1500	30,00	7,5

Tabla 3.22. Características de muestras de compost de distintos orígenes

Compost	FORM	RSU	Fangos depuradora urbana		Fangos mixtos	
pH	6,90	7,80	7,50	7,10	7,02	7,16
CE dS/m	6,70	11,40	2,58	4,43	5,93	13,42
% Humedad	32,68	28,41	36,0	28,09	19,80	30,07
ppm N-NH_4 Soluble	754	1772	1010	7477	2562	13560
% SVT	58,96	50,26	56,23	64,29	47,87	74,46
% N_{org}	1,95	1,35	2,90	3,59	2,03	8,48
C/N	15	19	10	9	12	4
%GE	52,60	30,96	54,62	44,69	42,43	21,77
%P	0,58	0,40	2,04	2,50	1,46	1,60
%K	1,23	0,64	0,49	0,41	0,70	1,48
%Ca	5,99	5,64	6,40	14,12	12,20	3,61
%Mg	0,53	0,41	0,34	0,76	0,51	0,43
%Na	0,59	0,83	0,22	0,17	0,53	0,91
%Fe	1,00	1,06	1,72	1,40	2,40	0,49
ppm Zn	179	659	360	940	456	337
ppm Mn	177	238	230	145	236	711
ppm Cu	89	238	160	329	142	59
ppm Ni	48	72	68	91	32	7
ppm Cr	22	28	43	59	43	8
ppm Pb	59	169	64	16	50	16
ppm Cd	0,36	0,91	0,85	1,95	0,67	0,36

A lo largo del proceso de compostaje, la mezcla tratada sufre una serie de transformaciones importantes:

- Se reduce la humedad y el contenido en materia orgánica.
- Varían los contenidos en las distintas formas de nitrógeno.
- Aumenta la estabilidad de la materia orgánica y se incrementan relativamente todos los componentes minerales que no puedan ser perdidos por lixiviación o volatilización.
- Algunos fitonutrientes se vuelven más difícilmente asimilables.
- Aumentan el pH, la conductividad eléctrica y las densidades aparente y real.

En la Tabla 3.22 se muestran las características de muestras de distinto origen comercializadas como compost. Sus características indican claramente las diferencias entre los materiales compostados, así como el tipo de tratamiento recibido. Las plantas que reciben más de un tipo de residuos para tratar no siempre realizan las mezclas adecuadas, ni el tratamiento de compostaje que se les aplica tiene las condiciones y la duración aconsejables. A pesar de pretender ser materiales compostados puede verse en la Tabla 3.22 que los valores del grado de estabilidad son bajos para algunos de ellos o que el contenido en nitrógeno amoniacal en algunos casos es elevado indicando mezclas o control del proceso incorrectos.

Según Haug (1993) el compost puede definirse como *materia orgánica que ha sido estabilizada hasta transformarse en un producto parecido a las sustancias húmicas del suelo, que está libre de patógenos y de semillas de malas hierbas, que no atrae insectos o vectores, que puede ser manejada y almacenada sin ocasionar molestias y que es beneficiosa para el suelo y el crecimiento de las plantas.* Según los datos de la Tabla 3.22 hay ciertos tipos de compost que estarían de acuerdo con esta definición (los de las columnas sombreadas) y otros que podrían plantear problemas en su aplicación al suelo y, en algunos casos, también en el supuesto de que sólo se hubiera compostado para poderlos verter con más garantías.

El RD 824/2005, sobre productos fertilizantes, regula la utilización del compost y experimenta restricciones importantes en el contenido en metales respecto la anterior norma de fertilizantes y afines. En base a ello, establece tres clases de compost (A, B y C) que condicionan la utilización que se pueda hacer de él (Tabla 3.23).

Tabla 3.23. Contenido en metales permitido en tres muestras de compost según el RD 824/2005, de 8 de julio, sobre productos fertilizantes

	Clase A	Clase B	Clase C
Cd (mg/kg s.m.s.)	0,7	2	3
Cr total (mg/kg s.m.s.)	70	250	300
Cu (mg/kg s.m.s.)	70	300	400
Hg (mg/kg s.m.s.)	0,5	1,5	2,5
Ni (mg/kg s.m.s.)	25	90	100
Pb (mg/kg s.m.s.)	45	150	200
Zn (mg/kg s.m.s.)	200	500	1000

En resumen, para compostar fangos se debería:

- Conocer el proceso de compostaje, sus fundamentos y requerimientos para obtener el mayor beneficio del proceso.
- Definir claramente el objetivo del compostaje: obtener un producto o simplemente estabilizar para ir a vertedero.
- Tener en consideración la legislación vigente y la prevista y disponer de los medios necesarios para cumplirla.
- Conocer bien la composición del fangos para asegurar, por una parte que no contenga contaminantes y por otra poder compostarlo de manera que pueda servir para la obtención de un producto (compost) beneficioso para el suelo y la producción vegetal, evitando en todo momento pérdida de nutrientes o problemas ambientales y molestias en el entorno.
- Disponer de materiales de características complementarios para el co-compostaje con los lodos.

14. La metanización. Proceso de tratamiento anaerobio

Como comentario preliminar a la profusión de «ecoparcs» en España dentro de los cuales se ubica siempre una metanización, vale la pena apuntar que lo primero que debe llevarse a cabo es una caracterización exhaustiva y concienzuda del RSU a tratar, puesto que con frecuencia los pretratamientos precisos son inadecuados o simplemente inoperantes para el tratamiento al que deben estar destinados y el resultado final es un fracaso estrepitoso. Otro aspecto a contemplar, si bien está técnicamente resuelto, es la desulfuración del biogás. Además la legislación ambiental de seguridad obliga a tener en cuenta las condiciones de explosividad.

La metanización de los RSU exige un sofisticado pretratamiento pero hay que ser consciente que, con frecuencia, no son capaces de discernir entre fracción orgánica e inorgánica. Los procesos biológicos, ya sean aerobios (compostaje) o anaerobios (metanización), son los más efectivos para el tratamiento de residuos de alta carga orgánica, como es el caso de los RSU, que se caracterizan por una DQO de más de 250.000 ppm. Existen diferencias básicas entre ambos procesos. Por ejemplo, el compostaje elimina el 80% de la materia orgánica en forma de biomasa y el 20% restante como CO_2 y H_2O, mientras que la metanización transforma la materia orgánica en una mezcla de biomasa (5%) y biogás (95%), susceptible de ser aprovechado como combustible.

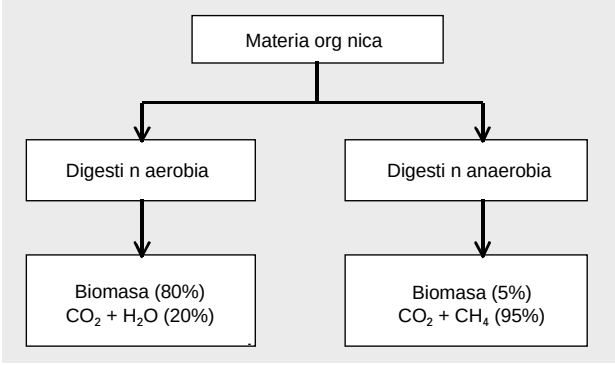


Figura 3.36. Rendimiento de los procesos biológicos de tratamiento de la fracción orgánica de los RSU.

La metanización es un proceso biológico que, en ausencia de oxígeno, transforma la materia orgánica en metano (entre un 50% y un 80% del total del biogás generado) y dióxido de carbono (entre un 20% y un 50%); es una tecnología adecuada para tratar fangos procedentes de EDAR, fracción fermentable de los RSU, purines de cerdo, etc. Esta fermentación puede llevarse a cabo en digestores en los que se controla la temperatura y el tiempo de residencia de los residuos. La degradación anaerobia de la fracción orgánica tiene lugar de acuerdo a la siguiente ecuación:

materia orgánica + nutrientes + microorganismos $\rightarrow$
$\rightarrow$ CH_4 + CO_2 + NH_3 + H_2S + materia orgánica +
+ microorganismos

La mezcla de metano y dióxido de carbono generado en la reacción se conoce como biogás, y puede emplearse como combustible parecido al gas natural.

Habitualmente, los procesos de metanización se llevan a cabo en condiciones mesofílicas de temperatura (35 ℃), debido al bajo requerimiento energético para mantener la temperatura. Otra posibilidad es trabajar en un rango térmico termofílico (55 ℃), aunque en este caso, a pesar de que las necesidades energéticas son superiores, la velocidad de degradación es mayor así como la eficacia de destrucción de los organismos patógenos.

Como se ha explicado anteriormente, la metanización consiste en la transformación en condiciones anaerobias una parte de la fracción fermentable de los residuos en gas metano para su posterior valorización. El principio de funcionamiento, como indica el esquema de la Figura 3.38, consiste en las siguientes fases:

- Triaje y separación de la fracción fermentable. En principio, el proceso se adapta a los denominados residuos húmedos: restos de comida, residuos de jardín, etc.
- Alimentación del residuo preparado en el digestor anaerobio.
- El biogás generado en los digestores es una mezcla de CH_4 y CO_2; el proceso que se lleva a cabo es lavado, compresión y almacenamiento en un gasómetro. Los porcentajes de ambos gases son variables y dependen de las condiciones fisicoquímicas en que se desarrolla la digestión de la materia orgánica. El biogás puede servir de combustible para una unidad de cogeneración, o quemarse en una antorcha. El biogás generado debe someterse a un proceso de depuración mediante el cual se separa el CH_4 del CO_2 y de otros gases que aparecen en menor proporción, a los efectos de su utilización energética de acuerdo a la normativa vigente. Existen diferentes formas para realizar dicha depuración, siendo en todos los casos técnicas probadas y relativamente convencionales. El potencial energético de los RSU puede estimarse, en función de las experiencias europeas, en aproximadamente 100 m^3 de metano (a presión atmosférica) por cada tonelada de residuo.
- La fracción residual no gasificada, es decir, el fango, se extrae por la parte inferior y se puede someter a compostaje.

Como se ha puesto de manifiesto anteriormente, la eficiencia de transformación de estas plantas (la unidad de masa hace referencia a la materia digerida, no a la entrada, términos que se confunden con fre-

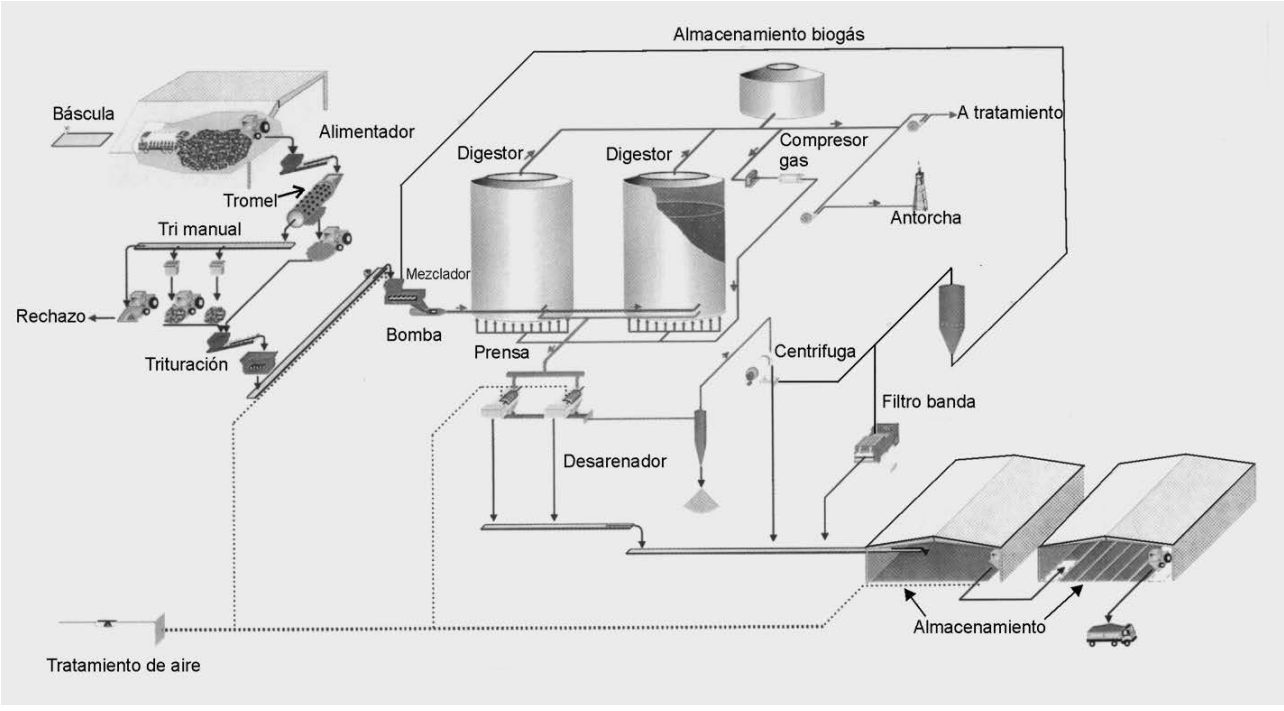


Figura 3.37. Esquema básico de un proceso de metanización.

cuencia), muchas de ellas en fase semiindustrial, es la siguiente:

$$125\ m^3 \text{ de biogás} \rightarrow \text{Tonelada de materia fermentable digerida}$$

El proceso de metanización empieza separando de los RSU la fracción orgánica de la inorgánica. La eficacia de la selección en origen es muy importante, ya que de esta forma se evitará que el producto final contenga sustancias tóxicas y perjudiciales; la presencia de metales pesados limitará su posible uso final. La fracción fermentable se tritura, se criba y posteriormente se pasteuriza, eliminando los agentes patógenos. A continuación se lleva el material al digestor donde se descompone por las bacterias, formando el biogás. En el biorreactor el tiempo de permanencia de la fracción orgánica puede llegar a ser de unos 30-35 días. La Figura 3.38 representa esquemáticamente el proceso de metanización. El material digerido resultante tiene un aspecto fibroso, y puede emplearse para recubrir vertederos, o como bases en carreteras.

En el proceso de digestión anaerobia se distinguen tres etapas características:

- *Hidrólisis.* Los polímeros orgánicos insolubles, como carbohidratos, celulosa y grasas se descomponen en CO_2, H_2, NH_3 y ácidos orgánicos mediante enzimas producidas por bacterias hidrofílicas. Durante esta fase se genera un nivel de CO_2 del 80%.
- *Acidogénesis.* Los ácidos orgánicos generados en la etapa anterior se transforman en ácido acético. La concentración de dióxido de carbono disminuye respecto a la primera etapa.
- *Metanogénesis.* En esta etapa se genera metano (60%) y dióxido de carbono (40%), mezcla conocida como biogás.

La calidad del biogás determina su empleo final. Resulta limitante la presencia de ácido sulfhídrico, generado en los procesos de reducción de las bacterias en el biorreactor, ya que puede ocasionar procesos de corrosión en los equipos, además de ser un problema para el medio ambiente. El biogás puede emplearse como combustible en hornos y calderas, previa eliminación de la humedad, y de los gases tóxicos y corrosivos. El proceso de metanización presenta diversas ventajas:

- Mayor homogeneización en la composición a medida que aumenta el tiempo de retención de la fracción orgánica. Un mayor tiempo de retención implica una alto índice de degradación anaeróbica.
- Eliminación de malos olores.
- Ausencia de compuestos orgánicos volátiles.
- Fácil manipulación de la fracción sólida digerida.
- Balance energético positivo, contribuyendo a la disminución de las necesidades energéticas externas para procesos térmicos posteriores. La biometanización puede producir hasta 150 kWh por cada tonelada de fracción orgánica fermentable tratada.
- Disminución de la generación de gases de efecto invernadero.

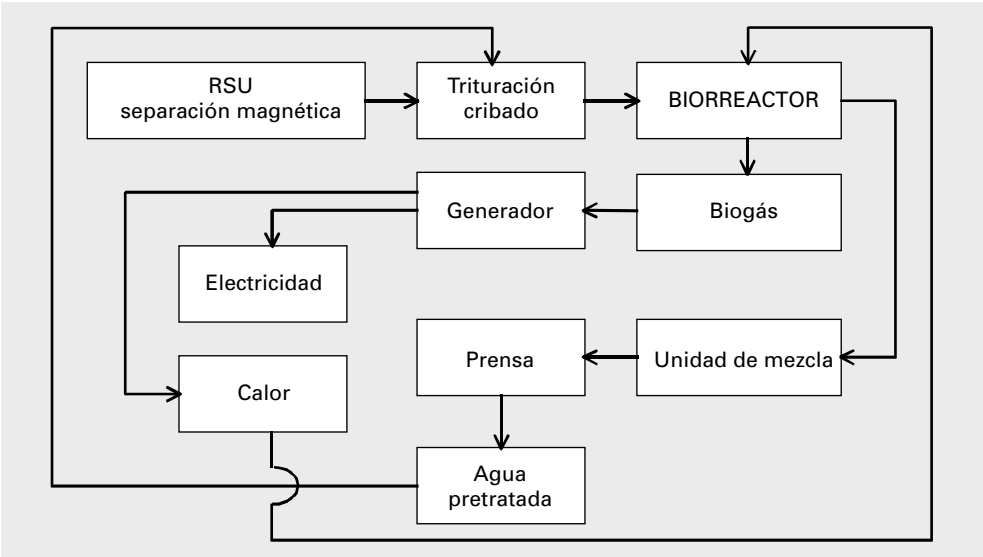


Figura 3.38. Representación esquemática de un proceso de digestión anaerobia.

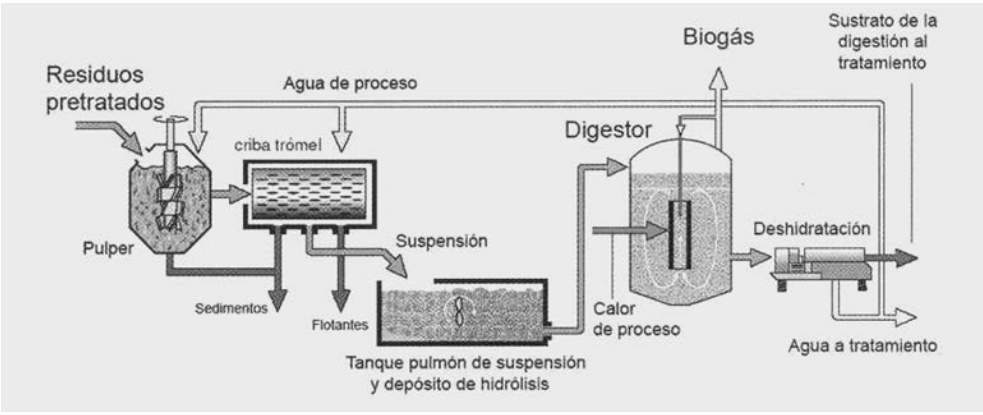


Figura 3.39. Principio de biometanización por vía húmeda.

14.1. VARIANTES DE LA METANIZACIÓN

Previamente es preciso indicar que, al margen de los sistemas seco y húmedo, el tamaño del digestor es fundamental. Muchos digestores extraídos de modelos han fracasado debido a la variación o alteración de la caracterización del RSU del que se tomaba de referencia.

Por lo general son válidos los siguientes principios:

- El proceso mesofílico es más flexible, es decir mas adaptable a las variaciones de composición de los RSU. No obstante al trabajar a baja temperatura (sobre los 37 ℃) no es tan efectivo como el termofílico (máximo 65 ℃). Es por ello que la mayoría de los compradores se decantan por los primeros.
- La metanización genera un biogás (de media un 9% en términos de peso) y un digestato que se envía a comportar que resulta ser, por término medio del 30%.

En función de la humedad se distingue entre:

14.1.1. Metanización húmeda

Se debe añadir agua a los residuos hasta que el contenido de sólidos este entre el 10 y el 15%. Es un proceso idéntico al usado para el tratamiento de fangos de EDAR. Proporciona una mayor homogeneidad al sustrato y un menor consumo energético en las bombas de trasiego. El material a tratar se puede almacenar a la entrada del digestor de forma automática. El tiempo de residencia es más corto que en la vía seca y los procesos bioquímicos son más rápidos. Se consume más agua y, obviamente, mayores efluentes. La Figura 3.39 muestra un esquema de la biometanización Linde-KCA.

En el punto 13 del DVD adjunto se muestra información complementaria sobre la metanización húmeda.

14.1.2. Metanización seca

El contenido de sólidos a la entrada del digestor oscila del 20 al 40%. En teoría, la producción de gas es mayor, por volumen de reactor. Se pueden añadir materiales de poca biodegradación como el papel o el cartón. Es preciso triturar adecuadamente (mayor consumo energético). Se emplea menos cantidad de agua y la cantidad de efluentes a depurar será también menor. El pretratamiento preciso es más caro que en caso anterior (los inertes no deben tener un tamaño superior a 10 mm). La Figura 3.40 muestra

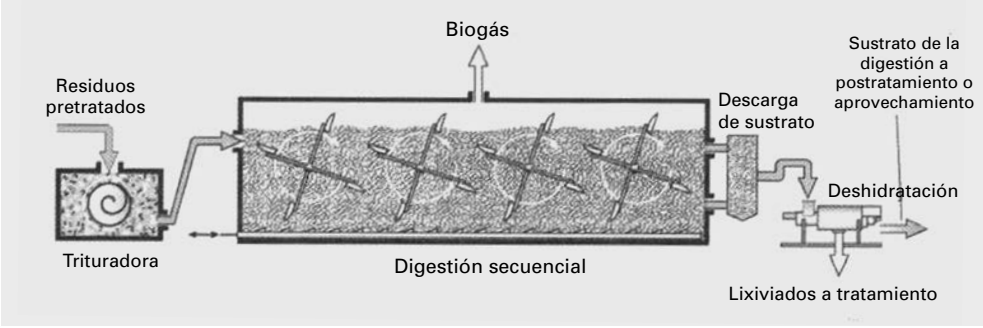


Figura 3.40. Principio de biometanización por vía seca.

un esquema de la biometanización Linde-BRV, también semejante a la Dranco.

En el punto 14 del DVD adjunto se muestra información complementaria sobre la metanización seca.

14.1.3. La biometanización de residuos mezclados

En zonas o localidades de peculiar configuración, como es el caso de las islas, la Figura 3.41 se refiere al principio de funcionamiento de una planta de biometanización de fangos de EDAR y fracción separada de RSU, corresponde a la isla de Lanzarote (Canarias, España).

Este tipo de tecnología, mezcla de residuos esta en fase experimental, no obstante se le augura un gran futuro.

14.2. EL TRATAMIENTO DE LOS BIOGASES PROCEDENTES DE SISTEMAS DE CONVERSIÓN ENERGÉTICA

Es difícil dar características de un biogás procedente de un digestor (y/o metanizador) sin detallar el sustrato de referencia. Es por ello que los datos que aparecen en la Tabla 3.24 referidos a la unidad de materia seca, son de carácter orientativo.

Tabla 3.24. Calidad de gases de digestor según materia prima

Sustrato	Biogás (m^3/kg sobre ms)	Metano (m^3/kg sobre ms)
Fangos de EDAR	0,43	0,34
RSU	0,61	0,38
Fangos de papeleras	0,25	0,15
Residuos mataderos	0,24	0,15
Residuos de cerveza	0,43	0,33
Residuos lácteos	0,98	0,78
Estiércol vacuno	0,40	0,90
Estiércol porcino	0,26	0,21
Hojas de patatas	0,53	0,40
Hojas de maíz	0,49	0,41
Hojas de remolacha	0,46	0,39

Los estudios especializados sobre generación de biogás llegan a la conclusión de que se obtienen mejores resultados cuando se mezclan diversas materias primas, entre otras razones porque las bacterias consumen el carbono unas 30 veces más depri-

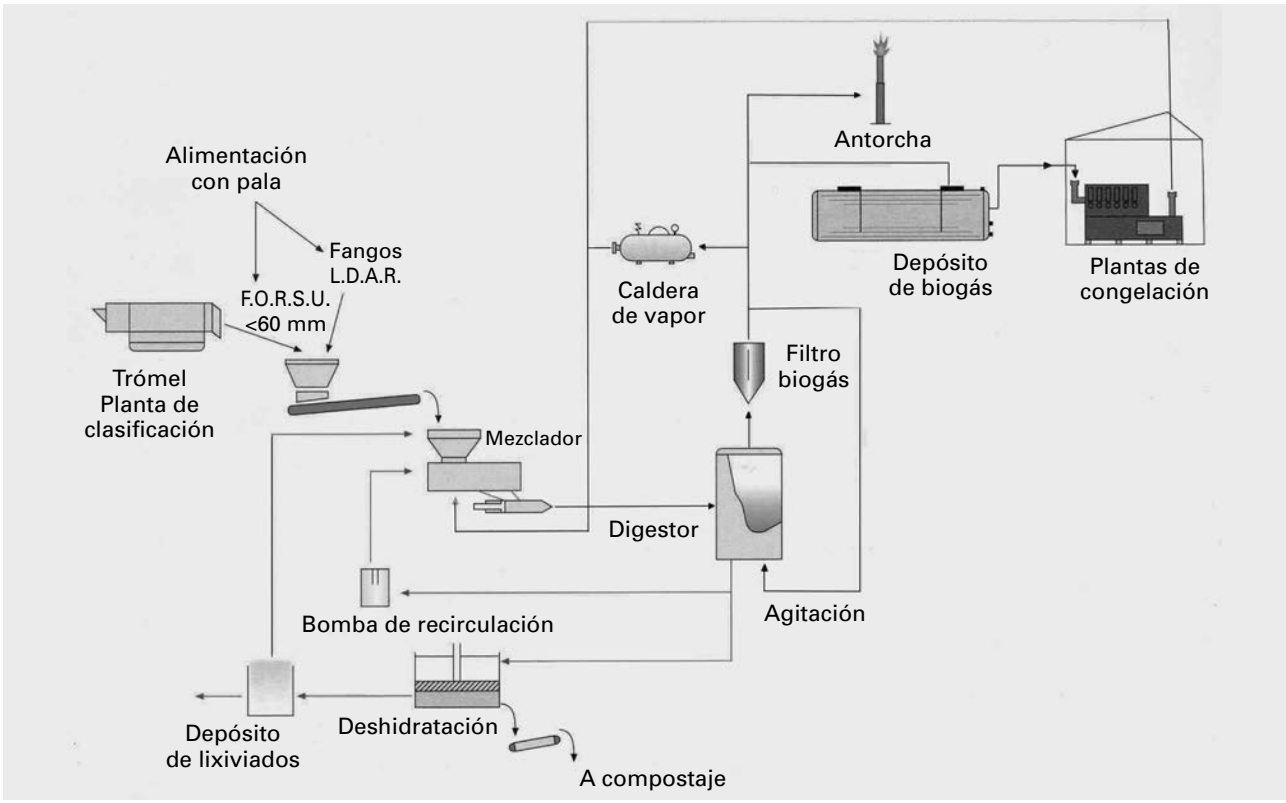


Figura 3.41. Principio de biometanización de residuos mezclados

sa que el nitrógeno, por ello la relación optima C/N ha de ser del orden de 25-30/1. Así, algunos residuos ganaderos y fangos de depuradora presentan menores potenciales de producción de gas. Esto es debido tanto al relativamente bajo contenido en materia orgánica como a la baja biodegradabilidad de la misma.

En otros procesos de conversión energética, como la pirólisis, que se llevan a cabo habitualmente a temperaturas entre 450 ℃ y 800 ℃, los residuos combustibles se transforman en gases, líquidos (vapores a las temperaturas de proceso) y productos carbonosos sólidos denominados «coque» de pirólisis. Esta técnica se utiliza desde hace mucho tiempo para producir carbón activado y carbón vegetal. Y, últimamente para obtener aceite de pirólisis como combustible y, una vez depurado para su empleo en turbinas.

La pirólisis de los residuos sólidos urbanos lleva a la liberación de un gas de proceso, que es una mezcla de CH_4 (aproximadamente un 30%), CO (20%), CO_2 (25%), H_2 (25%), e hidrocarburos ligeros. Otros gases que se pueden formar son: H_2S por inclusiones de los sulfuros, y HCl y HF procedentes de los compuestos halogenados orgánicos. En resumen, los avances de la tecnología también podrían hacer que fuesen competitivos a medio plazo otros biocarburantes líquidos o gaseosos obtenidos de la transformación termoquímica de la biomasa, como el biodimetiléter, el biometanol, o los bioaceites (obtenidos por pirólisis).

La gasificación puede considerarse como otra técnica de tratamiento pirolítico, definida como la conversión de una sustancia sólida o líquida que es transformada en una mezcla combustible gaseosa mediante oxidación parcial con aplicación de calor. La propia dinámica del proceso de gasificación conduce a que el gas de síntesis obtenido tenga un PCI notablemente inferior al gas de pirólisis, debido a la gran cantidad de aire introducido. Para mejorar la potencia calorífica del gas se debe usar aire enriquecido con oxígeno o, a veces también con vapor de agua. De esta manera los componentes habituales del gas pobre, o gas de síntesis, son CO, H_2, CH_4, H_2O, N_2 y pequeñas cantidades de hidrocarburos superiores. En resumen, al someter un combustible de naturaleza compleja a altas temperaturas, a bajas concentraciones o en ausencia de oxígeno (pirólisis), se liberan aquellas sustancias que, ya existiendo o formándose nuevas, son volátiles a estas temperaturas. Finalmente se obtiene un sólido rico en carbono en equilibrio con una mezcla de gases y vapores formados por agua, CO_2, CO, CH_4, C_2H_6, CH_3OH, etc. A partir del gas de síntesis se puede producir la generación a gran escala de hidrógeno, haciendo posible la producción posterior de amoníaco por su reacción con nitrógeno, y de metanol, materia prima en la producción de metil-terbutil-éter, entre otros compuestos. La importancia del gas de síntesis radica en que se puede transformar en combustibles líquidos (metanol, etileno, amoniaco y gasolinas) o incluso como agentes para la producción de acero en hornos de venteo.

En todos los gases citados existe, casi siempre un elemento común: el/los gases ácidos que exigirán su previa limpieza antes de ser valorizados. Además de los métodos tradicionales de desulfuración con limaduras de hierro o con ciertos tipos de tierras conocidas, como hematites parda o limonita, las cuales son ricas en sustancias ferrosas, existe un procedimiento basado en la adición de aire al 1,5% del volumen de biogás producido. Con este método se asegura una disminución del contenido de H_2S de aproximadamente 120 ppm o 0,012% en volumen de biogás.

Otro procedimiento es por medio del funcionamiento de un reactor que utiliza un sistema catalítico. El proceso básico consiste en poner en contacto una disolución de sulfato férrico con un gas que contiene H_2S en una torre de absorción. La disolución absorbe el ácido sulfhídrico y lo oxida a azufre elemental que precipita:

$$2H_2S + Fe(SO_4)_3 \rightarrow 2S_{(s)} + 2H_2SO_4 + FeSO_4$$

El azufre elemental se retira del medio mediante una operación de separación y, la disolución resultante se pasa a través de un reactor biológico donde la bacteria *Acidithiobacillus ferroxidans* cataliza la reacción que transforma el Fe(II) en Fe(III):

$$FeSO_4 + 2H_2SO_4 + O_2 \rightarrow Fe(SO_4)_3 + 2H_2O$$

Con lo que el proceso global puede esquematizarse como:

$$2H_2S + O_2 \rightarrow 2S_{(s)} + 2H_2O$$

Lo que implica la eliminación del ácido sulfhídrico y su transformación en azufre sólido en forma de precipitado. El coste de la operación supone la tercera parte del realizado por métodos químicos.

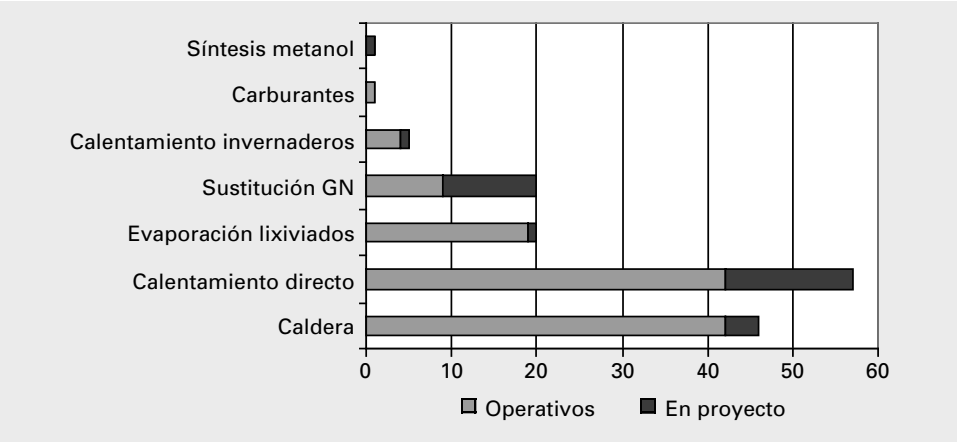


Figura 3.42. Distribución de proyectos de valorización del gas de vertedero.

La conversión del biogás en pseudogás natural es una aplicación en la cual el gas debe cumplir con las especificaciones normalmente exigidas para el gas natural. Los sistemas pueden ir provistos de membranas o de carbón activo. El objetivo de este sistema es la eliminación de CO_2, H_2S, cloro y flúor.

14.3. VALORIZACIÓN DEL GAS DE VERTEDERO

La generación y captación de gas de vertedero se halla extensamente desarrollada en el Capítulo 11 de esta obra. Sin embargo, en aras a facilitar información sobre las posibilidades de valorización, solo en EE UU, existe una serie de proyectos, en 2005, que se pueden resumir en:

- Cogeneración en motor: 200 en servicio y 50 en proyecto.
- Cogeneración en turbina de gas: 30 y 3 en proyecto.
- Cogeneración en microturbinas de gas: 15 y 2 en proyecto.
- Cogeneración en turbina de vapor (ciclo Rankine): 10.
- Ciclo combinado: 2.
- Motor Stirling, Pila de combustible y Ciclo orgánico de Rankine: 1 de cada.

También en EE UU y en 2005, la Figura 3.42 muestra la distribución de proyectos de empleo directo del gas de vertedero, como si de un combustible convencional se tratara.

Para calibrar la importancia de esta valorización, basta con un ejemplo. La generación de 3 MW(e) con gas de vertedero, evita la emisión de casi 7.000 t de metano, que equivale, aproximadamente, a la sustitución de:

- El equivalente a 28.000 coches.
- 38.000 acres de árboles.
- 300.000 barriles de petróleo.

Es por esta razón que la desgasificación de vertederos (obligatoria en la UE) se ha transformado en un mecanismo que permite la obtención de bonos de carbono.

15. Resumen de las tecnologías aptas para el reciclado de residuos

En primer lugar hay que indicar que las tecnologías explicadas en el capítulo son las se ajustan mejor a la misión dual de tratamiento y valorización de residuos. No obstante, las que se citan no son las únicas, ni esta lista pretende ser ciertamente exhaustiva. Tan sólo se resumen las más utilizadas para la conversión de los residuos en materiales aptos para la construcción.

De hecho, las tecnologías expuestas anteriormente, y ahora resumidas, responden al espíritu del dominio de los materiales simples o compuestos representados en la Figura 3.43. Así, por ejemplo, una solidificación de hidróxidos de metales pesados en hormigón podría considerarse como un *composite* de metal en matriz cerámica (el diagrama incluye el cemento dentro de la familia de los cerámicos).

La interacción entre el reciclaje de materiales y/o residuos, y el dominio de nuevos materiales es clara en algunos sectores:

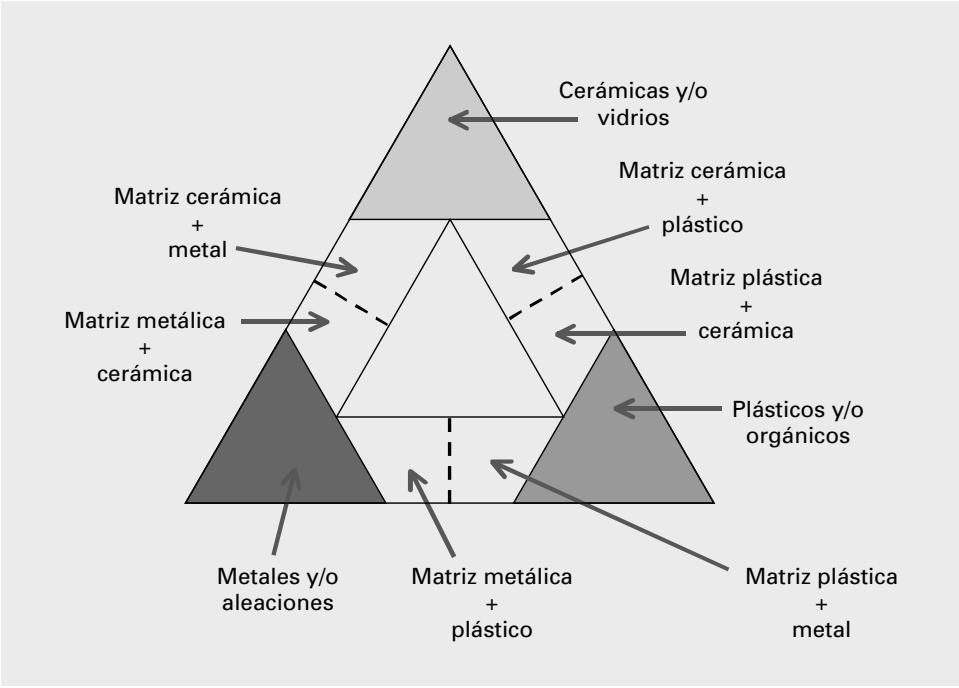


Figura 3.43. Representación esquemática de los materiales y sus mezclas.

- *Metales y aleaciones.* Desde la antigüedad , los metales se vuelven a convertir en materiales metálicos, o en aleaciones previa fusión. El reciclaje juega un papel predominante en la metalurgia de alguno de ellos como el hierro o el plomo.
- *Plásticos.* Los materiales plásticos son de reciente aparición y los campos del reciclaje no se están todavía tan desarrollados. Sin embargo, serviría de ejemplo ilustrativo el reciclado mecánico de plásticos procedentes de postconsumo para su transformación en nuevos materiales.

Más novedoso es el campo del reciclaje de residuos que se ha abierto a través de las técnicas de la ceramización o la vitrificación, explicadas ampliamente en capítulos posteriores y resumidas a continuación:

- *Ceramización.* Cuando el residuo a tratar contiene principalmente fracción orgánica, éstos desaparecen y en su lugar aparece una determinada porosidad que confiere al material propiedades de aislamiento térmico o acústico. Si el residuo contiene metales pesados u otros compuestos de naturaleza inorgánica, éstos quedaran insertos en la fase vítrea de la matriz cerámica; a partir de residuos, esencialmente, inorgánicos se fabrica un material cerámico denso, con otra gama de aplicaciones.
- *Vitrificación.* Se trata de la tecnología más segura para lograr la inertización de un residuo. Se reserva para residuos inorgánicos tóxicos que sean poco o nada solubles en agua. A diferencia de la ceramización, en el proceso de vitrificación se funde el cien por cien de los productos. Ello supone una pérdida total de la geometría, ya que el conjunto fluye del horno en forma líquida.

A continuación se resumen otro tipo de técnicas adecuadas para el reciclaje de residuos:

- *Procesos térmicos.* Se trata de un conjunto de operaciones donde la temperatura juega un papel fundamental. Los objetivos principales son eliminar la toxicidad del residuo a base de su destrucción térmica y procurar la máxima recuperación del calor: valorización energética. Desde el punto de vista de la valorización para la fabricación de materiales de construcción, los procesos térmicos actúan de reactor, pero estrictamente no deberían considerarse como tecnologías de reciclaje de materiales.
- *Procesos de solidificación.* Consisten básicamente en mezclar el residuo con materiales que rigidizan y mantienen la geometría del residuo, pero queda completamente encapsulado. La fiabilidad del método depende directamente de la toxicidad del residuo y de las caracte-

rísticas de impermeabilización del material envolvente.

- *Procesos mecánicos.* Se incluye el machaqueo, cribado y triaje de residuos para su adecuación. El objetivo principal es proporcionar una correcta distribución granulométrica para su posterior compactación. Además, estos procesos deben combinarse con los de retirada de productos indeseables. Su campo de aplicación es la adecuación de residuos a granel para el relleno y construcción de taludes, bases y subbases.
- *Compostaje.* Es una vía completamente aceptada para la higienización de aquellos residuos con elevada carga orgánica, exentos de metales pesados, para su transformación en abono.

A partir del Capítulo 5 se aplican las tecnologías descritas en este capítuloa un sin fin de residuos.

16. Tipologías de residuos y tecnologías aplicables al reciclaje

A título simplemente descriptivo y de resumen, las Tablas 3.24 y 3.25 exponen la aplicación de las tecnologías citadas atendiendo a las tipologías de residuos y sus limitaciones más sobresalientes. En dichas tablas, la columna presentación hace referencia a la fase en que encuentra el contaminante: líquido, sólido, en forma de fango, etc.

Tabla 3.24. Resumen de las tecnologías de tratamiento aplicables a residuos orgánicos

Contaminantes	Presentación	Tecnología	Limitaciones
Disolventes, COV's	Líquidos	Destilación	Presencia de impurezas
Restos de síntesis, termoplásticos, …	Sólidos, líquidos, fangos, etc.	Incineración	Explosivos
Materia orgánica, metales pesados, microorganismos, …	Sólidos, lodos, etc.	Ceramización	Presencia de halógenos
Polímeros, gomas	Sólidos	Pirólisis, gasificación, hidrogenación, etc.	productos intermedios, cargas, etc.
Materia orgánica, microorganismos, …	Sólidos, fangos, etc.	Compostaje, ceramización, etc.	Largo tiempo de compostaje

Tabla 3.25. Resumen de las tecnologías de tratamiento aplicables a residuos inorgánicos

Contaminantes	Presentación	Tecnología	Limitaciones
Metales pesados	Sólidos, lodos, arenas de fundición, escorias, etc.	Estabilización, solidificación	Lixiviación de metales
Metales pesados	Sólidos, lodos, polvos de acería, etc.	Vitrificación	Presencia de mercurio
Metales pesados de RSU, etc.	Sólidos, lodos, escorias	Ceramización	Presencia de halógenos y mercurio
Mercurio	Sólidos (pilas y baterías)	Destilación	—
Varios	Sólidos, lodos, etc.	Procesos mecánicos	—

Bibliografía

AIMME. IMPIVA. *Tecnologías de vertido cero en la industria de tratamiento de superfícies*. Generalitat Valenciana. Valencia, 1998.

ALMANSA, M. *Valoración del comportamiento de residuos orgánicos mediante incubación y aplicación en una rotación de cultivos extensivos.* PFC-ESAB – Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Agrària de Lleida. 2000.

ANDERSON, K. Hazardous waste management in Sweden. En: *International Perspectives on Hazardous Waste Management*. Londres, 1987.

APPLYING COMPOST BENEFITS AND NEEDS. *Seminar Proceedings Brussels*, 21-23 Nov. 2001. http://europa.eu.int/comm/environment/waste/compost/index.htm (15/10/2004).

ARBIOL, M., BENITO, P. SOLIVA, M., VILLALVA, D., MOLINA, N. Pruning residues and sewage sludge co.composting. Proceedings «International Conference on environmental pollution». 1993.

ASOCIACIÓN EUROPEA DE DISOLVENTES CLORADOS. Los disolventes clorados: reciclado y emisiones. *Revista Ingeniería Química*. 1994, Noviembre.

BAKER, A. Accumulators and excluders. Strategies in the response of plants to heavy metals. J. *Plant. Nutr.* 1981.

BERTOLDI DE, M. *et al.* The biology of composting: a review. *Waste Man. Res.* 1983, 1.

BRIDGA, R. J. Considerer Fenton's Chemistry for Wastewater Treatment. *Chemical Engineering Progress*. 1995. Vol. 91, No 12, 62-66.

CAMILLERI, C. SGN France. *Méthanisation des effluents par la technologie á culture fixée: aplication aux industries agro-alimentaries et chimiques*. Cebedoc Editeur. Bélgica, 1987.

Canal de Isabel II. *Utilización agrícola de lodos de estaciones depuradoras de aguas residuales*. CYII.

COLIN, F. *et. al. Recent devolopments in sewage sludge processing*. Elsevier. Amsterdam.

COLLERAN, E. *et al.* Anaerobic digestion of agricultural wastes using the upflow anaerobic filter design. *Process Biochemestry*. 1982, Abril.

Directiva del Consejo 99/31/CE, de 26 abril 1999, relativa a la disposición de residuos («Directiva de vertederos»).

DRAGT, A. *Biotechniques for air pollution control and odour control polices*. Elsevier. Amsterdam, 1992.

DURANT, G. y GOMA, G. *Traitement des lisiers de porc par fermentation anáerobic.* Compte Rendu d'Activité. INSA, 1972.

EEA. 2001. *Down to eart: Soil degradation and sustainable development in Europe. A challenge for the 21st century.* EEA & UNEP, (Copenhaguen: European Environmental Agency, 2000. http//www.eea.eu.int (28/11/01).

ELIAS, X. *Tratamiento y valorización energética de residuos*. Madrid, Ed. Díaz de Santos,2005.

EUROPEAN COMMISSION 2001a. *The Soil Protection Communication* – DG ENV. 2001. Draft 26 October 2001.

EUROPEAN COMMISSION, DG ENV. *Pollutants in urban waste water and sewage sludge.* 2001.

EUROPEAN COMMISSION, DG ENV. E3-2000. Waste management. *Working Document on Sludge.* 3rd draft.

EUROPEAN COMMISSION. DG ENV. Evaluation of sludge treatments for pathogen reduction. 2001.

FELIPÓ, M. T. Utilización de materia orgánica residual urbana en la recuperación de suelos degradados. En: «Agricultura y Medio Ambiente: Nuevos avances en conservación y manejo de agrosistemas». Fundación Universidad de Verano de Casilla y León. Segovia 1-5 de julio de 2002.

FINSTEIN, M. S. *et al.* Composting ecosystem management for waste treatment. *BioTechnology*. 1983, 1.

FREDERICK, R. J. *et al.* Enviromentally compatible applications of biotechnology. *Bioscience*. 1994, 44.

FREEMAN, H. M. *Standard handbook of hazardous waste treatment and disposal*. McGraw-Hill. New York.

GOMA, G., FINCK, J. *Fermentation méthanique: aspects théoriques et practiques*. CPCIA, Narbonne, 1981.

GOODWIN, R. W. Utilization aplications of resource recovery residue. *Procedings*. First US Conference of MSW Management. DC, june 1990.

GROOT, G. J. *et al. Characterization of the leaching behaviour of intact products.* Petten, Países Bajos, 1990.

HAUG, R. T. *The practical handbook of compost engineering.* Lewis Pub. 1993.

http://www.europa.eu.int/comm/environment/agriculture/studies.htm (5/12/01).

JACKSON, D.R. Evaluation of solidification residue from munucipal solid waste combustor. *US EPA*, 1990, febrero.

KIRCHMANN, H., LUNDWALL. A. Relationship between nitrogen immobilization and volatile fatty acids in soil after application of pig and cattle slurry. *Biol Fertil Soils*. 1991, n.º 15, 161-164.

LED ITALIA SRL. Tratamiento de los residuos líquidos del lavado de vehículos mediante evaporación en vacío. *Revista Tecnología del Agua*. Diciembre de 2002.

LEVIN, M. y GEALT, M. *Biotreatment of industrial and hazardous waste*. New York. Mc-Graw-Hill.

LÓPEZ , M., HUERTA, O., VALERO, J., SOLIVA, M. Raw organic materials origin and compost heavy metal contents. En: Bernal, M.P., Moral, R., Clemente, R., Paredes, C. (eds). Sustenaible Organic Waste Management for Environmental Protection and Food Safety. *Proceedings of 11th International Conference of the FAO ESCORENA Network on Recycling of Agricultural*, Municipal and Industrial Residues in Agriculture. RAMIRAN. Murcia, 6-9 de Octubre de 2004. Vol. II: p. 113-114.

MOUSTY, P. *et al.* Stabilization of sewage sludge using various composting processes. *Waste Man. Res.* 1985, 2.

NESHEIWAT, F. K. Clean contaminated sites using Fenton's Reagent. *Chemical Engineering Progress*, 2000, vol. 96, No 4, 61-66.

ORDOÑEZ , S. *et al.* Emisiones de disolventes clorados ligeros. *Revista Ingeniería Química*. 1997, Enero.

PAREDES, C., BERNAL, M. P., MORAL, R., CLEMENTE, R. (eds). Sustenaible Organic Waste Management for Environmental Protection and Food Safety. Proceedings of 11th International Conference of the FAO ESCORENA Network on Recycling of Agricultural, Municipal and Industrial Residues in Agriculture. RAMIRAN. Murcia, 6-9 de Octubre.

REAL DECRETO 261/1996, de 16 de febrero, sobre protección de las aguas contra la contaminación producida por los nitratos procedentes de fuentes agrarias.

REAL DECRETO 824/2005, de 8 de Julio, sobre productos fertilizantes.

ROBERY, P. C. *The use of domestic incinerator ash as an aggregate in concret*. PhD. Thesis. Leed University, UK, 1981.

SCHEERER, J. *et al.* Tecnología de biorreactores de membranes en el marco de la reutilización de aguas residuales. *Tecnología del Agua*. Núm. 257 (2005).

SIKORA, L. y SOWERS, M. Effect of temperature control on the composting process. *Environ Qual.* 1985, 14.

SLOOT VAN DER, H. *et al.* Leaching characteristics of construction materials and stabilization products containing waste materials. En: *Environamental aspects of stabilization and solidification of hazardous and radioactive waste*. ASTM STP 1033 Philadelphia, USA, 1989.

SOLIVA, M. Compostatge i gestió de residus orgànics. *Estudis i Monografies*, 21. Servei de Medi Ambient de la Diputació de Barcelona, 2001.

SOLIVA, M., GIRÓ, F. *Composting of three kinds of residues of very different origin 1989*. Acta Horticulturae 302.

SOLIVA, M., LÓEZ , M., HUERTA, O., VALERO, J. y FELIPÓ, M. T. *Waste organic matter quality versus soil amendment effects*. 2004.

SOLIVA, M., MANZANO, S., GIRÓ, F. Nitrogen loss during composting. Compost Science-Utilization. 1993. 1(4): 23-26.

SOLIVA, M., MOLAS, J., GARCÍA, V., FERRER, R., BALDI, M., 1983. Possible use residual sludges from paper industry as a substrate. *Acta Hort.*, 150: 531-544.

SOLIVA, M.; FELIPÓ, M. T. (2002). Organic wastes as a resource for Mediterranean soils. En: Langenkamp, H. and Marmo, L. (eds) *Biological treatment of biodegradable waste. Technical aspects.* Workshop. Brussels 8-10 April 2002, pp. 249-272.

TORMA, A. E. Leaching of metals. *Biotechnology*, vol. 6b. Verlag Chemie. Berlín, 1988.

USEPA. Bureau of Reclamation. *Manual de tierras*. Editorial Técnica Bellisco.

USEPA. *Characterization of MSC ashes and leachates from MWS landfils, monofils and co-disposal sites*. Office of Solid Waste. (October 1987).

VEIGA, M. *et al.* Tecnologías actuales para el tratamiento de aire contaminado con compuestos orgánicos volátiles: la biofiltración. *Revista Ingeniería Química*. 1996, Diciembre.

WILES CARLTON, C. A review on solidification and stabilitation technologies. *Journal of Hazardous Materials*, 1987.

Tipología de los residuos en orden a su reciclaje

4

Xavier Elias, Joan Feliubadaló, Xavier Flotats, Jordi Garcia, Albert Magrí, Susana Pombo, Rita Puig

ÍNDICE

1. Noción de carga contaminante 175
2. Factores de riesgo asociados a los residuos ... 175
3. Lixiviación y carga contaminante 176
3.1. Corrosión 177
4. Test de lixiviación 178
5. La resistencia a la lixiviación 179
5.1. Evaluación del test de lixiviación 180
6. Codificación de residuos. Catálogo de residuos 181
7. Las tipologías de residuos, su codificación y la sistemática del catalogo para el tratamiento y la valorización de residuos 183
7.1. Residuos de la producción primaria agraria, hortícola, de la caza, de la pesca y de la acuicultura; residuos de la preparación y elaboración de alimentos (código 01) .. 183
7.2. Residuos de la transformación de la madera y de la producción de papel, cartón, pasta de papel, tableros y muebles (código 03) 192
7.3. Residuos de la industria textil, del cuero y de la piel (código 04) 193
7.4. Residuos del refino de petróleo, purificación del gas natural y tratamiento pirolítico del carbón (código 05) 204
7.5. Residuos de procesos químicos inorgánicos (código 06) 205
7.6. Residuos de procesos químicos orgánicos (código 07) 206
7.7. Residuos de la formulación, fabricación, distribución y utilización (FEDU) de revestimientos (pinturas, barnices y esmaltes vítreos), pegamentos, sellantes y tintas de impresión (código 08) 207
7.8. Residuos de la industria fotográfica (código 09) 211
7.9. Residuos inorgánicos de procesos térmicos (código 10) 211
7.10. Residuos inorgánicos que contienen metales procedentes del tratamiento y revestimiento de metales y de la hidrometalurgia no férrea (código 11) 212
7.11. Residuos del moldeado y tratamiento de superficie de metales y plásticos (código 12) 213
7.12. Residuos de aceite (excepto aceites comestibles y los apartados 05 y 12) (código 13) 214
7.13. Residuos de sustancias orgánicas utilizadas como disolventes (excepto las apartados 07 y 08) (código 14) 216
7.14. Residuos de la construcción y demolición (incluyendo la construcción de carreteras) (código 17) 216
7.15. Residuos de las instalaciones para el tratamiento de residuos, de las plantas externas de tratamiento de aguas residuales y de la industria del agua (código 19) 216
7.16. Residuos municipales y residuos asimilables procedentes de los comercios, industrias e instituciones, incluyendo las fracciones recogidas selectivamente (código 20) 218
8. Constituyentes de los residuos potencialmente peligrosos 228
8.1. Productos tóxicos y residuos contaminantes. 228
8.2. Los COP's y el convenio de estocolmo 229
8.3. Los pañales usados 230
8.4. Transformación de residuos de animales .. 231
9. Actividades que pueden generar residuos potencialmente peligrosos 235
9.1. Los envases de fitosanitarios 236

9.2. Naturaleza y caracterización de los residuos sanitarios 237
10. Residuos y tecnologías aplicables para su reciclaje 239
11. Concentración del contaminante y recuperación 240
12. Reciclaje directo e indirecto 242
13. Reciclaje multidisciplinar 242
14. Reciclaje de materiales en europa 243
14.1. Valorización de residuos industriales de gran producción 245
15. Eficiencia recicladora en España a partir de RSU 246
15.1 Modelos de gestión de RSU 246
15.2. Residuos tóxicos contenidos en los RSU 247
15.3 Los residuos industriales 248
16. Los suelos contaminados como residuos valorizables 249
16.1. Definición y alcance de los suelos contaminados 249
16.2. Reciclabilidad de los suelos contaminados 250
17. Mercado de productos y servicios ambientalmente correctos 252
17.1. Industrias consumidoras de residuos industriales 253
17.2. La compra verde 253
18. Instalaciones, mecanismos y herramientas para reducir el impacto de los residuos 253
18.1. Ecoparque 253
18.2. Noción de impacto ambiental 255
18.3. Etiqueta ecológica 256
18.4. Sistema de ecogestión y ecoauditoría en la UE 256
18.5. Control integrado de la contaminación (IPPC) 257
Bibliografía 258

RESUMEN

Una vez descritas las tecnologías de tratamiento y valorización aptas para el reciclaje de residuos, en el presente capítulo se exponen las diversas características y tipologías de los residuos, para explicar como pueden ser valorizados.

El presente capítulo realiza una breve descripción entre la capacidad de lixiviación de un residuo y su potencial carga contaminante, a fin de justificar la distinción entre el llamado reciclaje directo e indirecto. También se describen unas nociones sobre los suelos contaminados, para poder trazar su paralelismo con los residuos.

En líneas generales, la filosofía que puede desprenderse del texto parte del Catálogo Europeo de Residuos pero los va clasificando en residuos livianos de naturaleza orgánica, aptos para su transformación en biocombustibles o materiales de construcción ligeros, dadas sus buenas propiedades de aislamiento térmico y acústico. Mientras que los residuos de naturaleza inorgánica, más densos, son adecuados para su reciclaje en forma de materiales para la construcción, pues presentan altas prestaciones mecánicas. Finalmente existe otra topología de residuos para los que, de momento, no hay otra alternativa que el tratamiento.

1. Noción de carga contaminante

La carga contaminante se define como la cantidad de sustancias perniciosas contenidas en un residuo determinado. Esta cantidad suele expresarse de diversas maneras; así, en el caso de las aguas residuales se contemplan, entre otros, los siguientes parámetros:

- *Sólidos totales (ST).* Corresponde a la cantidad de materia sólida contenida por unidad de medida, y son responsables de las impurezas visibles. Los sólidos totales equivalen a la suma de todos los sólidos disueltos y suspendidos en el agua; los sólidos totales pueden ser sustancias orgánicas e inorgánicas, microorganismos, y partículas más grandes, como arena y arcilla. La materia suspendida consiste en partículas muy pequeñas, que no se pueden eliminar por medio de deposición. En los líquidos las unidades suelen expresarse en mg/l (miligramos de contaminante por litro de líquido), o en ppm (partes por millón). La presencia de sólidos en el agua no implica necesariamente su toxicidad, aunque representan un elemento indeseable. La materia suspendida en el agua absorbe la luz, haciendo que el agua tenga una cierta turbidez.
- *Sólidos volátiles (SV).* Hace referencia a la cantidad de sustancias volátiles que pueden desprenderse de un líquido o de un fango cuando son sometidos a un proceso de digestión. Se suele expresar en kg de sólidos volátiles por cada metro cúbico de líquido o de fango procesado. Ello tiene sentido cuando un residuo, por ejemplo un purín, se somete a un proceso de digestión anaerobia con el propósito de transformar parte de su materia orgánica en biogás.
- *Demanda química de oxígeno (DQO).* Corresponde a la cantidad de oxígeno que se precisa para poder oxidar todos los compuestos orgánicos e inorgánicos susceptibles de combinarse con el oxígeno. Suele expresarse en mg/kg o en ppm. Este dato por sí solo es insuficiente por cuanto un residuo industrial puede tener un alto valor de DQO pero tratarse de un residuo biodegradable.
- *Demanda biológica de oxígeno (DBO).* Equivale a la cantidad de oxígeno consumido para provocar la biodegradabilidad de la materia orgánica presente en el agua. La DBO_5 se define como la cantidad de oxígeno requerido por las bacterias para convertir en 5 días los residuos orgánicos en compuestos estables. Las unidades con las que se expresa la DBO son ppm y adquiere sentido en aquellos residuos que hayan de someterse a procesos de degradación para la recuperación de biogás.

2. Factores de riesgo asociado a los contaminantes

La afección al medio que pueden originar los residuos es muy dilatada, y la descripción de los diversos tests y análisis para calibrar los riesgos resultaría un trabajo ímprobo que además desviaría el objetivo de la presente obra, que es el reciclaje de residuos. Es por ello que tan solo se describirá, aunque superficialmente, el test de lixiviación. No obstante, la Tabla 4.1 resume la evaluación del comportamiento de los residuos en función de su evolución, integración o transformación en el medio ambiente.

Tabla 4.1. Efectos medioambientales causados por la presencia de residuos

Factor de riesgo	Propiedades globales	Método de determinación
Movilidad de los residuos	Forma física	– Caracterización y medida de las proporciones relativas de las diversas fases (especialmente la fracción líquida). – Granulometría de la fase sólida y grado de dispersión de las fases líquidas no miscibles. – Medida de la viscosidad de las fases líquidas.
Persistencia de los residuos	Persistencia química	– Evolución cinética después de la incorporación al suelo.
	Persistencia biológica	– Medida de la biodegradabilidad. – Definición del estado final del residuo.

Tabla 4.1. *(Continuación)*

Factor de riesgo	Propiedades globales	Método de determinación
Contaminación potencial del residuo	Generación inmediata de contaminación	– Caracterización de la fracción líquida.
	Contaminación a medio y largo plazo	– Determinación del estado final del residuo: test de envejecimiento. – Determinación por la fracción soluble potencial: test de lixiviación acelerado.
Peligrosidad por lixiviación	Toxicidad	– Toxicidad vs. organismos vivos.
	Patogenicidad	– Análisis microbiológico.
	Criterios de calidad en relación a la futura utilización	– Análisis y medidas de las propiedades generales: corrosión, etc. – Límites de utilización.
Persistencia de la contaminación por lixiviación	Biodegradabilidad aerobia y anaerobia	– Medida de la DBO. – Medidas respirométricas. – Medidas de biodegradabilidad completas. – Tests biológicos.
	Adsorción	– Isotermas con carbón activo.
	Capacidad de captación de diversos iones	– Isotermas de adsorción de arcillas.

3. Lixiviación y carga contaminante

Antes de entrar en las diversas clasificaciones en que se pueden agrupar los residuos desde el punto de vista de la valorización, conviene dedicar unas líneas a lo que se entiende por peligro real de un residuo al ser abandonado al medio. Si un agua superficial o subterránea se pone en contacto con un material, cada componente del mismo se disuelve a una velocidad finita. Incluso en los residuos solidificados más impermeables, como arcillas, cemento, vidrio, etc., el agua puede penetrar en su interior y disolver parte de los componentes del residuo, por lo que no se puede hablar de materiales completamente insolubles. Cuando un residuo, independientemente de que como ha sido tratado, se pone en contacto con el agua se puede medir su velocidad de disolución. Este proceso se conoce como lixiviación; el agua que inicia el proceso se llama lixiviante y al agua contaminada se la denomina lixiviado. La capacidad del material de lixiviar es conocida como lixiviabilidad.

La lixiviación mide la capacidad de liberación de una sustancia tóxica a partir de un residuo cuando éste está sometido a unas determinadas condiciones que se encuentran bien detalladas por diversas normas. En general, el test de lixiviación, como se detalla en apartados posteriores, consiste en mantener el residuo inmerso en un agua con un carácter ligeramente ácido, e ir analizando su calidad. De este análisis puede deducirse que un residuo pueda contener una gran cantidad de materia tóxica pero ser inmune a la acción del agua. Un caso típico es un vidrio de plomo, cuyo contenido en plomo puede superar el 30% en peso; sin embargo, soportaría cualquier test de lixiviación.

Otro aspecto se refiere a la carga o potencial de carga contaminante; en el ejemplo expuesto anteriormente, el plomo es un metal pesado y, como tal, se encuentra regulado en todas las legislaciones. El vidrio de plomo es un residuo con una alta carga contaminante, pero con una capacidad de lixiviación nula. Sin embargo, el polvo de acería contiene poco plomo, pero su capacidad de lixiviar es enorme.

La Figura 4.1 expone para algunos residuos industriales corrientes esta correlación. Los residuos más peligrosos corresponderían a los situados en las coordenadas máximas, mientras que los menos peligrosos quedarían localizados en el origen de coordenadas.

Como primera conclusión se deduce que el tratamiento de los residuos puede establecerse en tres niveles:

- *Nivel A: estructuras bien ligadas.* En principio, estos residuos son aptos para usos a granel. Los residuos integrados en el nivel A de la Figura 4.1 están total o parcialmente vitrificados; ello significa que los diversos elementos contaminantes que componen el residuo difícilmente saldrán de su entorno. Ejemplo de estos resi-

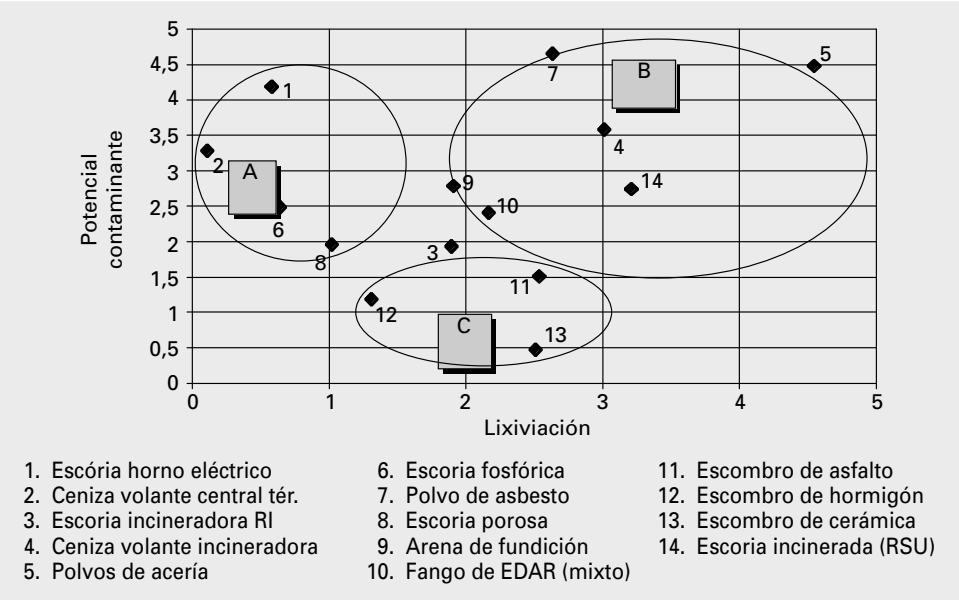


Figura 4.1. Potencial contaminante vs lixiviación.

duos son las cenizas volantes de las centrales termoeléctricas, las escorias de altos hornos, la escoria fosfórica, etc. Ello implica que estos residuos puedan depositarse a granel en terraplenes, rellenos, subbases de carreteras, etc., sin que se presenten problemas significativos.

- *Nivel B: estructuras sin ligar.* A estos residuos se les debe aplicar un tratamiento severo de inmovilización de contaminantes, como podría ser la vitrificación o la ceramización. Al contrario que en el caso anterior, los polvos de acería o los lodos de asbesto, contenidos en el nivel B de la Figura 4.1, presentan estructuras sin ningún tipo de ligazón, por lo que los compuestos tóxicos pueden ser liberados al medio con gran facilidad. Esto significa que para su reutilización han de ser sometidos previamente a un proceso de reciclado que asegure que los componentes nocivos no serán liberados al medio ambiente.
- *Nivel C: estructuras poco ligadas.* Para este tipo de residuos se recomiendan tratamientos físico/químicos usuales más o menos simples. La resistencia a la lixiviación de los residuos circunscritos en el nivel C de la Figura 4.1 es relativamente elevada, aunque su potencial contaminante es reducido. Un proceso de encapsulación en hormigón suele ser suficiente para poder reaprovechar estos residuos para posteriores aplicaciones no especiales.

3.1. CORROSIÓN

En términos estrictamente químicos, para medir el efecto de un líquido sobre un material se hablaría del valor de pH. Valores bajos del pH (acidez) o anormalmente altos (basicidad o alcalinidad) producen reacciones agresivas en los materiales. Un residuo debe considerarse corrosivo si una muestra representativa del mismo tiene las siguientes propiedades:

- Es líquido con un pH inferior a 2 o superior a 12,5. La Figura 4.2 muestra, de manera didáctica, la relación entre el pH y la previsible corrosión.
- Es líquido y corroe un acero (SAE 1020) a un *ratio* mayor de 6,35 mm por año a una temperatura de 55 ºC.

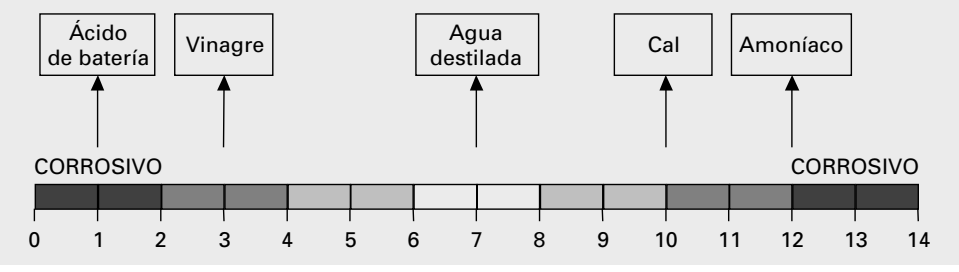


Figura 4.2. Corrosividad y pH.

4. Test de lixiviación

La primera pregunta que cabria hacerse es: ¿Si con un test de lixiviación lo que se pretende comprobar es si el contaminante va a ser liberado al medio un día u otro, por qué se emplea un ácido débil como el acético y no otro fuerte como el sulfúrico?. La respuesta parece obvia: el test de lixiviación ha sido concebido como una especie de certificado para tener la garantía de que el residuo, cuando se deposite en el vertedero, no va a liberar los contaminantes en el medio que impera en el depósito, donde debido a las condiciones anaerobias el líquido contaminante abundante es ácido gracias a la presencia del acético. El espíritu de esta obra es fomentar el reciclaje y la valorización, por tanto se destinan unas líneas a definir la lixiviación y los diferentes métodos de llevarla a cabo. Sin embargo hay que advertir que si lo que se pretende es reciclar el residuo en forma de material de construcción, debería realizarse en cada caso, un test de lixiviación específico.

Todo residuo antes, durante y después de ser depositado en el vertedero se halla sometido a un conjunto de reacciones químicas, a los agentes meteorológicos y en particular a la lluvia. Se define la lixiviación como la capacidad de arrastre de partículas contaminantes por el agua. A partir de este punto la contaminación se multiplicará, de ahí la importancia del test de lixiviación. La lixiviación depende de la naturaleza intrínseca del propio residuo y de otros factores:

- Condiciones medioambientales.
- Mecanismos químicos: pH, redox, formación de sales, etc.
- Mecanismos físicos: geometría y presentación del residuo: materiales granulares o monolíticos.

Cuando el destino del residuo es el vertedero se suele practicar el denominado test estándar de lixiviación, que consiste en triturar el residuo y ponerlo en contacto con agua ácida (acético) e ir controlando el arrastre de partículas contaminantes. Ello intenta reproducir lo que podría suceder a los residuos una vez depositados en el vertedero.

El test de lixiviación consiste en un ataque ácido y la comprobación posterior de la calidad del líquido una vez se ha puesto en contacto con el residuo. El ataque depende de los siguientes factores:

- Naturaleza del agente agresor.
- pH del medio.
- Temperatura.
- Tiempo de contacto.

Sin embargo, si el destino del residuo es el reciclaje, la tendencia actual es someter al material monolítico, por ejemplo, un bloque de hormigón con lodo al denominado *tank leaching test* (norma NEN 7345), que reproduce con mayor fidelidad el futuro comportamiento del material. En él se ensaya la probeta sumergida en agua a un valor de pH 4, y se renueva la solución de contacto, analizándola a tiempos fijos. La Tabla 4.2 muestra los valores límite del lixiviado según el *tank leaching test*.

El *tank leaching test*, el más interesante para la valorización de residuos, divide a los materiales en dos categorías:

- *Categoría 1:* materiales con valores de lixiviación acumulativa por debajo de los límites establecidos en la columna U_1 de la Tabla 4.2. Estos materiales no están sometidos a ninguna restricción medioambiental.
- *Categoría 2:* materiales con valores de lixiviación acumulativa superiores a los límites establecidos en la columna U_2 de la Tabla 4.2. Estos materiales se hallan sometidos a utilización restringida.

Tabla 4.2. Efectos medioambientales causados por la presencia de residuos

Contaminante	U_1 (mg/m²)	U_2 (mg/m²)
Arsénico (As)	40	300
Selenio (Se)	1,5	9,5
Bario (Ba)	600	4.500
Estaño (Sn)	25	200
Cadmio (Cd)	1	7,5
Vanadio (V)	250	1.500
Combustión	25	200
Zinc (Zn)	200	1.500
Cromo (Cr)	150	950
Bromo (Br)	25	200
Cobre (Cu)	50	350
Cloro (Cl)	20.000	150.000
Mercurio (Hg)	0,4	3
CN-complejo	6,5	50
Molibdeno (Mo)	15	95
CN-libre	1,5	9,5
Níquel (Ni)	50	350
Flúor (F)	1.500	9.500
Plomo (Pb)	100	800
Sulfatos (SO_4^{2-})	25.000	200.000
Antimonio (Sb)	3,5	25

5. La resistencia a la lixiviación

La gran incógnita que presenta un material que ha sido reciclado es saber cómo se comportará en servicio. La situación más corriente es el contacto del nuevo material con el agua, ya sea de lluvia o de escorrentía, y se trata de intentar extrapolar qué sucederá con los contaminantes cuando se hayan puesto en contacto con el agua. Por eso, una vez inertizado el residuo, o reciclado en forma de material para la construcción, es preciso someter el producto al test de lixiviación para conocer si libera sustancias tóxicas al medio y en qué cantidad.

En general, los materiales más resistentes a la lixiviación, en especial cuando las condiciones de contorno son extremas, son los materiales cerámicos y vitrificados. Ello se explica por la calidad de los enlaces moleculares.

La Figura 4.3 reproduce un diagrama triangular en el que aparecen diversas familias de materiales cerámicos. Conforme indica la flecha, la resistencia al ataque de los ácidos va aumentando a medida que los materiales están más vitrificados, en particular cuando el vidrio es mayoritario (caso de la sílice amorfa).

El comportamiento de un material frente a un medio agresor dependerá lógicamente de su compatibilidad. Así, si el medio agresor es agua con cierto carácter ácido el comportamiento será diferente si el material en cuestión es un carbonato o una aleación metálica, que serán atacados y destruidos, o si es un granito, una cerámica o un vidrio que, con mucha probabilidad, soportarán la agresión sin merma de sus propiedades. Ello es debido a que el ácido destruye el enlace, llevando a cabo una sustitución del hidrógeno por el metal, descomponiendo el material. La probabilidad de que esto ocurra es, en definitiva, una advertencia de que la lixiviación dependerá de la resistencia relativa del enlace y de la capacidad agresora del compuesto ácido.

En principio, los enlaces cristalinos son más resistentes que los enlaces existentes en las fases amorfas o vidrios. Sin embargo, hay que analizar el tipo de vidrio y de cristal. Así, la propia Figura 4.3 indica que la máxima resistencia al lixiviado se encuentra en un tipo de vidrio; éste es precisamente un vidrio de sílice (SiO_2) formado a más de 1.600 ºC a partir de cuarzo. En cambio, otros vidrios que funden a menor temperatura no son tan resistentes. La Figura 4.3 expone otros ejemplos. Los ladrillos refractarios de baja alúmina (15%) ceramizan a menor temperatura que los de alta alúmina. A mayor temperatura de ceramización, más resistentes son los cristales y, por tanto, más resistencia a la lixiviación. En el caso del gres químico se trata de una cerámica en cuya estructura hay, casi a partes iguales, vidrio y cristales, pero el hecho de que precisen una elevadísima temperatura de ceramización comporta que, tanto la fase amorfa como la cristalina, ostenten una alta resistencia a la lixiviación.

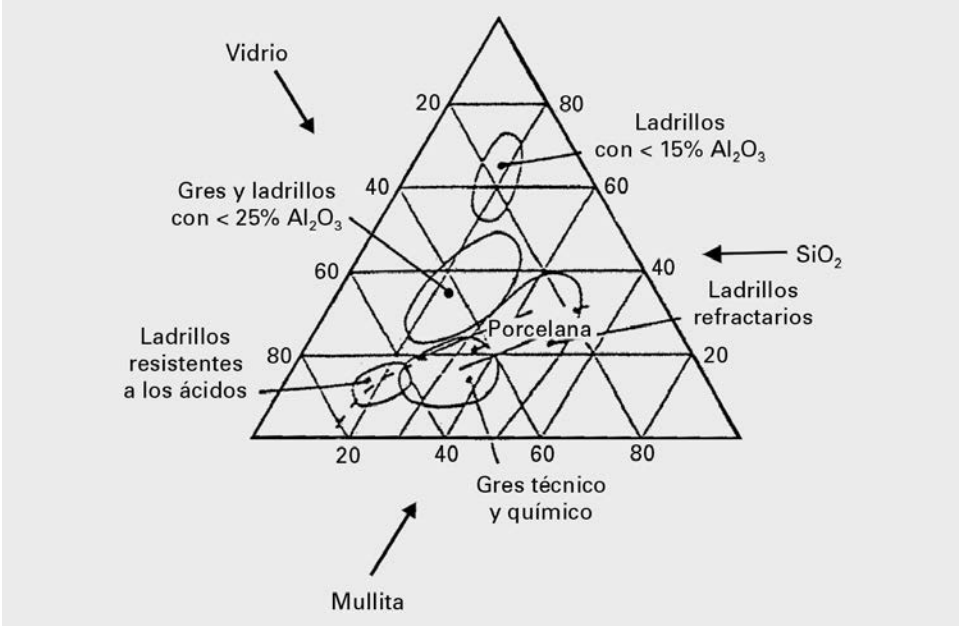


Figura 4.3. Resistencia al ataque de los ácidos.

Tabla 4.3. Ejemplos y aplicabilidad de diversos tests de lixiviación de la USEPA

Método	Propósito	Aplicación del material
EPA SW-846. Método 1311	Comparar el nivel de toxicidad con los lixiviados de vertederos de RSU y residuos especiales	– Residuos estabilizados. – Productos reciclados.
EPA SW-846. Método 1310	Evaluar la concentración de lixiviados en comparación con los vertederos	– Residuos estabilizados.
EPA SW-846. Método 1312	Aplicable a residuos expuestos a lluvia ácida	– Caracterización de residuos peligrosos.
SW-924	Aplicable a residuos depositados en zonas saturadas de baja permeabilidad	– Residuos monolíticos. – Residuos peligrosos.
ASTM D 3987-85	Suministrar medios para una rápida obtención del lixiviado	– Compuestos inorgánicos.

5.1. EVALUACIÓN DEL TEST DE LIXIVIACIÓN

Existen numerosos tests de lixiviación estandarizados o en vías de normalización. En la actualidad se tiende a la especialización, es decir, a usar el test que mejor se ajuste a las diversas solicitaciones a que puede verse sometido el residuo, el residuo estabilizado o el residuo una vez ha sido reciclado. Al margen de los ya citados tests europeos, sólo en Norteamérica existen unas 16 clases de tests diferentes. La Tabla 4.3 expone algunos de ellos.

Desde el punto de vista del procedimiento, la base de la fiabilidad de un test de lixiviación es la penetración del agua en el residuo, en un suelo contaminado, en un material estabilizado o en un producto reciclado, y analizar posteriormente el líquido extraído. Resulta conveniente llevar a cabo un análisis químico previo a la toma de decisión sobre la clase de test de lixiviación que se debe llevar a cabo. Para ello la USEPA tiene estandarizados unos métodos, que quedan reflejados en la Tabla 4.4, de acuerdo con la clase de contaminantes presentes. EL TCLP (por su nombre en inglés, *Toxicity Characteristic Leaching Procedure*) es el más común de los tests utilizados, ya que determina la movilidad de los contaminantes orgánicos e inorgánicos en la fase en que se encuentren.

Tabla 4.4. Análisis químicos estandarizados según los diversos métodos de la USEPA

Contaminantes	Método USEPA
Hidrocarburos propios del petróleo	418.1
Contenido de hidrocarburos lixiviables	8015
Compuestos organoclorados (incluidos los PCB)	8080
Compuestos orgánicos semivolátiles	8270
Corrosión	9045
Lixiviación de metales y de compuestos orgánicos e inorgánicos	TCLP
Toxicidad	96-h Bio Aquatic Assay

La Tabla 4.5 reproduce los contaminantes más habituales así como los niveles máximos definidos por el test TCLP.

Tabla 4.5. Niveles máximos de toxicidad definidos por el método TCLP

Contaminante		Nivel (mg/l)
Metales	Arsénico (As)	5,0
	Bario (Ba)	100,0
	Cadmio (Cd)	1,0
	Cromo (Cr)	5,0
	Plomo (Pb)	5,0
	Mercurio (Hg)	0,2
	Selenio (Se)	1,0
	Plata (Ag)	5,0
Compuestos orgánicos volátiles	Benceno	0,5
	Clorobenceno	100,0
	Tetracloruro de carbono	0,5
	Cloroformo	6,0
	1,4-diclorobenceno	6,0
	1,2-dicloretano	0,5
	1,1-dicloretileno	0,7
	Tetracloroetileno	0,7
	Tricloroetileno	0,5
	Cloruro de vinilo	0,2
Compuestos orgánicos semivolátiles	Cresol	200,0
	2,4-dinitrotolueno	0,13
	Hexaclorobenceno	0,13
	Hexaclorobutadieno	0,5
	Hexacloroetano	3,0
	Nitrobenceno	2,0
	Pentaclorofenol	100,0
	Piridina	5,0
	2,4,6-triclorofenol	2,0
Pesticidas organoclorados	Clordano	0,03
	Endrín	0,02
	Lindano	0,4
	Heptacloro (y su epoxi)	0,008
	Metoxicloro	10,0
	Toxofano	0,5

La Tabla 4.6 indica el comportamiento de los materiales refractarios a las agresiones de los vapores ácidos a temperaturas del orden de los 1.000 ℃.

Tabla 4.6. Comportamiento de los materiales cerámicos frente a vapores ácidos a altas temperatura

	Sílice fundida	Refractario baja Al_2O_3	Refractario media Al_2O_3	Refractario alta Al_2O_3	Circón	Carburo de silicio
H_2S	¤¤	¤¤				—
HCN	¤¤	—	—	—	¤	¤
HF	—	—	—	—	¤	¤¤
HNO_3	¤¤¤	¤¤		¤¤	¤¤	—
H_3PO_4	¤¤¤	¤¤			¤¤	
H_2SO_4	¤¤¤	¤¤	¤¤	¤¤	¤¤	¤¤
HCl	¤¤¤	¤¤	¤	¤¤	¤¤	¤¤

(¤¤¤: resistente; ¤¤: moderadamente resistente; ¤: poco resistente; —: sin resistencia).

6. Codificación de residuos. Catálogo de residuos

Tradicionalmente, en las tentativas de clasificación de los residuos, ha existido una separación entre los urbanos o municipales y los industriales. Dicha separación se basaba, fundamentalmente, en el origen de unos y otros y, secundariamente, en la dicotomía de la supuesta homogeneidad de los municipales *versus* heterogeneidad de los industriales. Otras veces las razones eran más bien de índole política o económica o, simplemente competencial. Sin embargo, ello conducía a absurdos tales como qué residuos de la misma naturaleza fisicoquímica y, por ende, que deben ser sometidos a las mismas vías de gestión, se consideraran y gestionaran como municipales o industriales según quien los hubiera producido (por ejemplo, los residuos de embalajes de cartón serían residuo industrial o municipal según que su generador fuera un establecimiento industrial o un particular o comercio sujetos a recogida y gestión municipales).

El Catálogo Europeo de Residuos (CER), última de estas tentativas (y, según parece, perdurable en el tiempo, debido a su rango normativo) supera dicha separación y clasifica y define los residuos en general en los 20 grupos que siguen, subdivididos a su vez en subgrupos y tipos. Dicha clasificación se ha basado, según los grupos, en analogías fisicoquímicas entre sus componentes o en analogía de proceso productivo de procedencia.

En el Capítulo 2 de esta obra se hace una referencia a esta primera experiencia española de clasificación de residuos. Así, la Tabla 4.7 reproduce el listado de residuos editado por la Agencia de Residuos de Cataluña (antigua *Junta de Residus del Departament de Medi Ambient de la Generalitat de Catalunya)*, llevado a cabo de acuerdo con la Directiva 75/442/CEE, de 15 de julio de 1975, relativa a los residuos. El CRC es una herramienta de gestión en la que se particulariza para cada residuo la información necesaria para su correcta gestión. Desde esta misma consulta se pueden seleccionar los transportistas y/o instalaciones autorizadas para transportar y/o gestionar el residuo consultado. Desde el día 1 de enero de 2002 está en vigor el nuevo Catálogo Europeo de Residuos (CER), que determina la codificación y clasificación de residuos.

Los residuos están ordenados, dentro de lo posible, por grupos lógicos industriales, procurando que los pertenecientes a un mismo epígrafe tengan unas características semejantes. En los siguientes apartados se explican las posibilidades de valorización de residuos, de algunos grupos de gestión más general, de acuerdo con las directrices que emanan del mencionado catálogo.

Tabla 4.7. Índice del catálogo de residuos y ejemplos de cada grupo

	Clasificación genérica	Ejemplos
01	Residuos de la prospección, extracción, preparación y otros tratamientos de minerales y canteras.	– Movimientos de tierras. – Acumulación de estériles. – Minerales de baja ley abandonados.
02	Residuos de la producción primaria agraria, hortícola, de la caza, de la pesca y de la acuicultura; residuos de la preparación y elaboración de alimentos.	– Purines. – Tejidos vegetales. – Orujos. – Lodos/Fangos de depuradoras (LD).
03	Residuos de la transformación de la madera y de la producción de papel, cartón, pasta de papel tableros y muebles.	– Corteza, aserrín, corcho, etc. – LD.
04	Residuos de las industrias textil, del cuero y de la piel.	– Carnazas, grasas, etc. – Ceras, tintes, pigmentos, etc.
05	Residuos del refino de petróleo, purificación del gas natural y tratamiento pirolítico del carbón.	– Lodos de operaciones de limpieza y mantenimiento. – Tierras contaminadas de hidrocarburos. – Soluciones acuosas aceitosas. – LD.
06	Residuos de procesos químicos inorgánicos.	– Soluciones ácidas. – Sales y soluciones alcalinas. – Soluciones con y sin metales. – Yesos. – Residuos de procesos de filtración. – Resinas. – Soluciones de limpieza. – LD.
07	Residuos de procesos químicos orgánicos.	– Aguas madres y soluciones líquidas. – Lodos y residuos sólidos de procesos de filtración. – Materiales absorbentes y filtrantes. – LD.
08	Residuos de la formulación, fabricación, distribución y utilización (FEDU) de revestimientos (pinturas, barnices y esmaltes vítreos), pegamentos, sellantes y tintas de impresión.	– Residuos de fabricación y uso de pinturas y barniz, tintas de impresión, colas, colas, resinas y sellantes. – LD.
09	Residuos de la industria fotográfica.	– Residuos que contienen plata procedente del tratamiento de productos fotográficos.
10	Residuos inorgánicos de procesos térmicos.	– Cenizas y escorias de hornos. – Polvos y cenizas volantes. – Polvo y lodos de fabricación de amianto y cemento. – Arenas de fundición verdes sin ligantes químicos. – LD.
11	Residuos inorgánicos que contienen metales procedentes del tratamiento y revestimiento de metales y de la hidrometalurgia no férrea.	– Líquidos y baños de tratamiento. – Lodos y residuos sólidos de tratamiento y revestimiento de metales.
12	Residuos del moldeado y tratamiento de superficie de metales y plásticos.	– Partículas plásticas. – Ceras, jabones y lubricantes residuales. – Lodos de desengrase de piezas y superficie. – LD.
13	Residuos de aceite (excepto aceites comestibles y los apartados 05 y 12).	– Aceites hidráulicos y líquidos de frenos usados. – Otros aceites hidráulicos clorados. – Aceites de aislamiento y de transmisión de calor. – Residuos aceitosos de navegación. – LD.
14	Residuos de sustancias orgánicas utilizadas como disolventes (excepto las apartados 07 y 08).	– Disolventes y refrigerantes recuperados. – Residuos de limpieza y desengrasado de metales, textiles y productos naturales. – LD.
15	Residuos de envases; absorbentes, trapos de limpieza, materiales de filtración y ropas de protección no especificados en otra categoría.	– Envases y embalajes sucios con residuos especiales. – Materiales adsorbentes procedentes de filtración. – Residuos de la limpieza de tanques y disolventes. – LD.

Tabla 4.7. *(Continuación)*

	Clasificación genérica	Ejemplos
16	Residuos no especificados en otro capítulo de la lista.	– Catalizadores retirados de vehículos. – Neumáticos usados. – Baterías. – Vehículos fuera de uso (VFU). – Cables. – Equipos electrónicos. – LD.
17	Residuos de la construcción y demolición (incluyendo la construcción de carreteras).	– Demolición de edificios y carreteras.
18	Residuos de servicios médicos o veterinarios y/o de investigación asociada (salvo los residuos de cocina y de restaurante no procedentes directamente de los servicios médicos).	– Objetos cortantes. – Citostáticos. – Radiografías.
19	Residuos de las instalaciones para el tratamiento de residuos, de las plantas externas de tratamiento de aguas residuales y de la industria del agua.	– Residuos de incineración. – Residuos de lixiviados de vertederos. – Lodos de tratamiento de aguas residuales industriales. – LD.
20	Residuos municipales y residuos asimilables procedentes de los comercios, industrias e instituciones, incluyendo las fracciones recogidas selectivamente.	– Maderas. – Residuos orgánicos. – Aceites vegetales.

Para mayor detalle, el lector puede consultar la página web: http://europa.eu/scadplus/leg/es/lub/l21197.htm

7. Las tipologías de residuos, su codificación y la sistemática del catálogo para el tratamiento y la valoración de residuos

Este apartado lleva a cabo una extensa revisión de tratamiento y valorización de los residuos partiendo del CER. Una consideración medianamente atenta de la Tabla 4.7 permite constatar que, excepto los grupos 01 (residuos mineros), 02 (agrícolas, ganaderos y de la industria agroalimentaria), 15 (materiales sucios), 16 (no especificados), 17 (construcción y demolición) y 18 (servicios médicos y veterinarios), todos los demás son perfectamente encuadrables en la denominación de residuos de la industria química.

Siguiendo, pues, el mismo criterio de clasificación del catálogo CER, y teniendo presente que muchos de los residuos agrupados por analogía fisicoquímica son multisectoriales, es decir, pueden proceder de varios sectores productivos, el presente capítulo describe pormenorizadamente los tipos de residuos de cada grupo y los métodos de gestión que el propio Catálogo preconiza para ellos, respetando la jerarquía de opciones establecida en la Directiva 91/156/CEE, es decir, considerando las vías de valorización (reutilización, reciclaje, etc.) con preferencia a las de tratamiento, destrucción y/o deposición.

Como se verá, la enorme heterogeneidad fisicoquímica de los residuos industriales, y en especial de los químicos, conduce un elevado grado de especificidad de las vías de gestión que les son aplicables, lo cual, a su vez, dificulta en gran medida el agrupamiento de tipos de residuos para su gestión, y obliga a altos grados de especialización de las instalaciones para su tratamiento.

Finalmente hay que advertir que el lector observará que a determinadas tipologías de residuos, como las deyecciones ganaderas o la curtición, este capítulo destina mucha extensión, mientras que a otros apenas se les presta atención. La razón es que la gran mayoría de residuos se describen en los sucesivos capítulos junto a la tecnología que se cree más adecuada para su valorización.

7.1. RESIDUOS DE LA PRODUCCIÓN PRIMARIA AGRARIA, HORTÍCOLA, DE LA CAZA, DE LA PESCA Y DE LA ACUICULTURA; RESIDUOS DE LA PREPARACIÓN Y ELABORACIÓN DE ALIMENTOS (CÓDIGO 01)

Tradicionalmente, la agricultura y la ganadería han sido actividades complementarias. Con el propósito de obtener mejores cosechas, las deyecciones ganaderas se han venido aplicando al suelo a modo de

fertilizante. Dicha aportación permitía, al mismo tiempo, cerrar el ciclo de la materia. En estas circunstancias, los excrementos animales eran un valioso recurso. Con la intensificación de la actividad ganadera y su desvinculación de la producción agrícola, las deyecciones ganaderas pueden convertirse en un grave problema medioambiental si no se gestionan correctamente. Aunque la actuación a priorizar continúe siendo su utilización como fertilizante de acuerdo con las necesidades de los cultivos, varios factores pueden hacer recomendable un tratamiento. El tipo de tratamiento a aplicar depende de la problemática a resolver, aunque el propósito final siempre debe ser el mismo: aumentar la capacidad de gestión. No existen soluciones únicas aplicables en cualquier circunstancia. Así, a lo largo de numerosos capítulos de esta obra aparecen residuos de esta codificación usados como «materia prima» para muchas aplicaciones. En el Capítulo 10 de esta obra se estudia el residuo agrícola como recurso valorizable pero en este apartado se revisan las principales estrategias de gestión y tratamiento de purines haciendo especial hincapié en aquellas que permiten su valorización.

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) publicó en Noviembre de 2006 un estudio en el que se revela que el sector ganadero genera el 18% de los gases de efecto invernadero (expresado en su equivalencia de CO_2), situándose por encima incluso del sector del transporte; en este mismo comunicado se destaca además que la ganaderia es una de las principales causas de la degradación del suelo y los recursos hídricos.

En este mismo comunicado se menciona que para el año 2050 la producción mundial de carne pasará de los 229 millones de toneladas del 2001 a los 465 millones; y la producción de leche pasará de 580 millones de toneladas en 2001 a 1.043 millones de toneladas en el mismo periodo, con el consecuente precio ambiental que esto supondrá. Adicionalmente, la ganaderia produce el 37% de todo el metano proveniente de la actividad humana.

7.1.1. Características de los purines

En la ganadería intensiva, los animales se acostumbran a estabular sobre suelos emparrillados (*slats*) sin cama. Este sistema permite la acumulación de las deyecciones (heces y orina) en fosas debajo los emparrillados a medida que son generadas, junto con una cantidad variable de agua, para su posterior gestión. A los residuos obtenidos en estas instalaciones se les denomina purines y su manejo, a diferencia del estiércol, puede asimilarse al de un líquido.

La composición de los purines es muy variable, dependiendo entre otros factores de: la especie animal, su estado fisiológico, la alimentación, el sistema de manejo, la gestión del agua, el sistema de limpieza o la época del año. A modo ilustrativo, la Tabla 4.8 muestra un rango de valores típico para la composición de purines de cerdo. Numerosas referencias bibliográficas cuantifican la producción en función del tipo de animal, especie y/o estado fisiológico.

A grandes rasgos, los purines se caracterizan por:

- Contenido elevado en agua, superando fácilmente el 90%. Este bajo contenido en sólidos totales (ST) es el principal limitante para su transporte.

Tabla 4.8. Composición, sobre materia fresca, de purines de cerdo (Bonmatí, 2001)

Parámetro	Unidades	Mínimo	Máximo	Media
pH		6,56	8,70	7,68
Alcalinidad Total (AT), como $CaCO_3$	g kg^{-1}	5,08	59,25	21,47
Sólidos Totales (ST)	g kg^{-1}	13,68	169,00	62,16
Sólidos Volátiles (SV)	g kg^{-1}	6,45	121,34	42,33
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	g kg^{-1}	8,15	191,23	73,02
Nitrógeno Total Kjeldahl (N_{TK})	g kg^{-1}	2,03	10,24	5,98
Nitrógeno amoniacal ($N\text{-}NH_4^+$)	g kg^{-1}	1,65	7,99	4,54
Fósforo (P)	g kg^{-1}	0,09	6,57	1,38
Potasio (K)	g kg^{-1}	1,61	7,82	4,83
Cobre (Cu)	mg kg^{-1}	9	192	40
Zinc (Zn)	mg kg^{-1}	7	131	66

- Poca materia orgánica. Este parámetro se mide a partir de los sólidos volátiles (SV) o bien de la demanda química de oxígeno (DQO). La relación SV/ST indica qué fracción de los sólidos presentes es asimilable a orgánica. Elevados tiempos de almacenamiento de los purines debajo de los emparrillados conlleva la volatilización de compuestos orgánicos volátiles (COV), reduciendo su disponibilidad para posteriores procesos de tratamiento que requieran de materia orgánica biodegradable.
- Contenido alto en nitrógeno amoniacal. El nitrógeno amoniacal ($N\text{-}NH_4^+$) representa alrededor del 75% del nitrógeno total Kjeldahl (N_{TK}) contenido en los purines. Este hecho junto con la poca materia orgánica presente sitúa a los purines más cerca de un fertilizante mineral que de una enmienda orgánica. En el momento de su generación, los purines no contienen cantidades apreciables de nitritos o nitratos.
- Contenido en fósforo y potasio. El fósforo (P) y el potasio (K) son elementos fertilizantes necesarios para los cultivos.
- Contenido apreciable en metales (Cu y Zn). En el caso de aplicación al suelo, estos metales se van acumulando y pueden llegar a ocasionar problemas de fitotoxicidad.
- Elevada capacidad tampón, según indica su alcalinidad (AT). Este hecho favorece algunos procesos de tratamiento, como por ejemplo la nitrificación, pero dificulta otros, especialmente aquellos que requieren una modificación del pH.

7.1.2. Condicionantes para la gestión, el tratamiento y la valorización

El marco legal actual y los documentos base de modificación o ampliación de éste, configuran la tendencia general respecto a la gestión y el tratamiento de residuos orgánicos. La Directiva europea 91/156/EEC de residuos, establece las bases para la gestión de éstos, cuyas palabras clave serían la reducción en su producción, el reciclaje y la reutilización. La Directiva europea 91/676/EEC, relativa a la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos utilizados en agricultura, establece restricciones al uso de abonos nitrogenados, entre los que se encuentran los residuos orgánicos, en zonas definidas como vulnerables, con el objetivo de luchar contra la contaminación difusa. La Directiva europea 96/61/EC relativa a la prevención y control integrados de la contaminación, más conocida como directiva IPPC, establece como objetivos la prevención y reducción integrada de la contaminación (de suelos, aguas y atmósfera) procedente de una serie de actividades, e introduce los límites de emisión en función de las mejores técnicas disponibles. La Directiva europea 99/31/EC relativa a vertederos, establece objetivos de reducción gradual y progresiva de la deposición de residuos biodegradables en vertederos.

El condicionante más importante para la gestión, el tratamiento y la valorización de los purines es su composición. Es por ello que cualquier acción encaminada a: 1) reducir su contenido en agua mediante la utilización de abrevaderos más eficientes o evitando que las aguas pluviales lleguen a balsas y fosas de almacenamiento; 2) disponer de balsas cubiertas para evitar almacenar agua de lluvia; 3) reducir el contenido en nutrientes (N y P) así como en metales mediante la modificación de las dietas; 4) reducir el tiempo de almacenamiento debajo de las naves disponiendo de balsas exteriores, permitirá mejorar la calidad de los purines.

Para ordenar la toma de decisiones es necesario partir de un plan de gestión de los residuos orgánicos generados en la zona geográfica objeto de trabajo, incorporando en el mismo plan residuos orgánicos de diferentes orígenes (fracción orgánica de residuos municipales, fangos de estaciones depuradoras de aguas residuales, residuos ganaderos y residuos orgánicos de la industria agroalimentaria). La gestión conjunta de estos residuos permite pasar de una situación de competencia por el suelo agrícola a otra de complementariedad. Un plan de gestión debe contemplar actuaciones en tres ámbitos distintos: 1) medidas de reducción en origen, tanto de caudales como de componentes limitantes; 2) plan de fertilización de la superficie agrícola de la zona objeto del plan de gestión; 3) definición de tratamientos según las necesidades puestas de manifiesto por el plan de gestión. A modo de ejemplo, el lector puede consultar Teira y Flotats (2003).

Sin ánimo de ser exhaustivos, en la Tabla 4.9 se sintetizan las características básicas de los procesos susceptibles de ser aplicados en un tratamiento, indicando las formas de energía limitantes. En todos los casos, la energía eléctrica se refiere a consumo de energía mecánica para separar fases, agitar o transferir oxígeno, mediante motor eléctrico.

El suelo no es un vertedero, sino un valor patrimonial a conservar y, en su caso, mejorar. Este principio básico implica que al suelo no se deben aplicar residuos, sino productos de calidad. Así pues, el objetivo de un tratamiento debe ser la modificación de

las características del residuo para su adecuación a la demanda como producto de calidad. No existe un tratamiento único, aplicable de forma universal a los purines. La idoneidad de un tratamiento dependerá de cada zona geográfica, de las necesidades que hayan puesto de manifiesto los estudios preliminares del plan de gestión, de la calidad del producto final obtenido y de los costes económicos asociados. En todo caso, el objetivo básico que se debe perseguir es el de aumentar la capacidad de gestión sobre el residuo. Los objetivos particulares pueden ser:

- Adecuar en el tiempo la producción de residuos y las necesidades de los cultivos.
- Transportar fuera de la zona de aplicación del plan de gestión.
- Valorizar económicamente el residuo.
- Adecuar la composición a los requerimientos del entorno (suelo, cultivos, aire,…).
- Extraer y recuperar nutrientes valorizables (nitrógeno y fósforo).
- Higienizar (reducir o eliminar patógenos).
- Producir energía.
- Aislar, en caso de no ser posible la valorización agronómica, previa estabilización y/o aprovechamiento energético.

En el punto 1 del DVD adjunto se muestra información complementaria sobre experiencias en el tratamiento de purines.

Tabla 4.9. Síntesis de operaciones aplicables al tratamiento de residuos ganaderos, en especial a purines de cerdo (Flotats *et al.*, 2000)

Proceso	Aplicado a T, S o L	Objetivo	Necesidades energéticas limitantes
1. Balsas de homogeneización, estercoleros	T, S, L	Regular la producción a las necesidades de los cultivos. Regular entradas discontinuas a plantas de tratamiento. Reducir patógenos.	
2. Separación de fases	T	Separar para propiciar líneas específicas de tratamiento, transporte o aplicación a la fracción S o L resultante.	E. eléctrica
3. Aplicación de enzimas y bacterias en balsas	T	Aumentar concentración de sólidos. Transformar nitrógeno amoniacal en orgánico.	
4. Nitrificación	L	Transformar nitrógeno amoniacal en nítrico.	E. eléctrica
5. Desnitrificación	T	Transformar nitrógeno nítrico a N_2. Eliminar materia orgánica fácilmente biodegradable.	
6. Descomposición aerobia heterótrofa	T, L	Eliminar materia orgánica.	E. eléctrica
7. Digestión anaerobia	T, S, L	Producir metano (energía). Eliminar materia orgánica. Higienizar.	
8. Compostaje	S	Eliminar/estabilizar materia orgánica. Higienizar. Obtener abono orgánico de calidad.	E. eléctrica E. mecánica
9. Acumulación biológica de fósforo	L	Transferir fósforo soluble a la fase biológica sedimentable. Eliminar materia orgánica fácilmente biodegradable.	E. eléctrica
10. Precipitación Química	L	Transferir algunos componentes a la fase sedimentable. Separar fósforo (estruvita, apatita).	
11. Secado/peletización	S	Separar agua. Reducir volumen.	E. térmica
12. Evaporación/ concentración	L	Separar agua. Reducir volumen.	E. térmica
13. S*tripping*/absorción	L	Recuperar nitrógeno amoniacal.	E. eléctrica E. térmica
14. Higienización térmica	T	Eliminar/inactivar patógenos. Hidrólisis térmica.	E. térmica
15. Dosificación de aditivos	T, S, L	Modificar composición para adecuarla a cultivos o posibilitar otros procesos.	
16. Ozonización	L	Oxidación compuestos orgánicos recalcitrantes	E. eléctrica
17. Filtración membranas/ osmosis inversa	L	Separar sales. Reducir conductividad.	E. eléctrica

(T: residuo íntegro; S: fracción sólida; L: fracción líquida).

7.1.3. Valorización agrícola directa

Un plan de fertilización debe confeccionarse a partir del conocimiento de la composición de los residuos, el mapa de suelos de la zona de aplicación, el tipo de cultivos existente, el sistema agrícola y las características climatológicas e hidrológicas de la zona. Dicho plan debe contemplar:

- Dosis de aplicación: número de aplicaciones al año y dosis anual total.
- Momento de aplicación: días entre precipitaciones y aplicación, en función de la pluviometría, el período de heladas y meses sin posible aplicación.
- Forma de aplicación: superficial, inyección, etc.
- Medidas complementarias, tales como la determinación de las distancias mínimas entre el área de aplicación y los cauces de agua.

La cantidad de purines que puede aplicarse como fertilizante para obtener el máximo crecimiento de los cultivos sin un efecto medioambiental negativo debe calcularse mediante un balance de nutrientes. Este balance puede realizarse para macronutrientes (N, P y K) o para micronutrientes, y también para componentes limitantes tales como metales pesados y/o patógenos. La elección del criterio utilizado para el cálculo depende de factores como: legislación, características edáficas o prácticas locales de fertilización. A principios del año 2006, de los componentes anteriormente mencionados, en España únicamente estaba regulada la aplicación del nitrógeno mediante los Códigos de Buenas Prácticas Agrarias elaborados por las Comunidades Autónomas. En otros países de la Unión Europea ya se ha empezado a legislar con el propósito de limitar las dosis de aplicación en relación al fósforo.

La ejecución del plan de fertilización es de elevada complejidad cuando se gestionan gran cantidad de parcelas y granjas. En este caso, es aconsejable el uso de aplicaciones informáticas.

7.1.4. Valorización energética

Por su naturaleza y básicamente por la cantidad de agua presente, la valorización energética de los purines se ha de basar en sistemas bioquímicos.

7.1.4.1. Digestión anaerobia

La digestión anaerobia consiste en un proceso biológico fermentativo, en el cual la materia orgánica es descompuesta y transformada en una mezcla de gases formada principalmente por metano y dióxido de carbono, conocida como biogás. Se trata de un gas combustible que posee una potencia calorífica inferior del orden de 22.000 $kJ \cdot Nm^{-3}$.

El proceso de digestión anaerobia aplicado a purines ha demostrado, a lo largo de las últimas décadas, su viabilidad técnica y versatilidad para adaptarse a diferentes condiciones de trabajo. En este sentido, existen experiencias de grandes instalaciones de gestión centralizada, plantas en granjas individuales, instalaciones sencillas de recuperación de gas en balsas cubiertas, tratando la fracción líquida o bien la fracción sólida. Se trata de uno de los procesos más idóneos para la reducción de emisiones gaseosas de efecto invernadero, el aprovechamiento energético de los residuos orgánicos, su higienización y el mantenimiento del valor fertilizante de los productos tratados, aunque por si sola no permite resolver un problema de excedente de nutrientes.

La eliminación de 1 kg de DQO mediante digestión anaerobia supone la producción de un máximo de 0,35 m^3 de metano en condiciones normales de presión y temperatura. En una granja de cerdos donde se generaran purines con una DQO de 93,2 g $O_2 \cdot l^{-1}$, que en medio anaerobio se eliminara el 50% de la DQO y que el biogás tuviera una composición del 65% en CH_4 y el resto en CO_2, la producción de biogás sería de 25 m^3 biogás por cada metro cúbico de purines tratados. Esta producción de biogás es muy baja en comparación con producciones obtenidas al tratar otros residuos, como los de la industria agroalimentaria, aunque podría incluso ser muy inferior en caso de partir de unos purines con menor contenido en DQO. Características típicas de los purines como son las altas concentraciones de $N\text{-}NH_4^+$ y metales (cobre y zinc), la presencia de antibióticos y desinfectantes, o bien la acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV) en el reactor, pueden afectar negativamente el proceso de digestión.

7.1.4.2. Codigestión de purines

El término codigestión se utiliza para expresar la digestión anaerobia conjunta de dos o más sustratos de diferente origen. La ventaja principal radica en el aprovechamiento de la sinergia de las mezclas, compensando las carencias de cada uno de los sustratos por separado.

Según se comentaba en el anterior apartado, los residuos industriales, y también los urbanos, sue-

len contener altas concentraciones de materia orgánica fácilmente biodegradable, por lo que presentan un mayor potencial de producción que los residuos ganaderos. Ello conlleva una mejora en la viabilidad económica de las plantas. Sin embargo, estos residuos pueden presentar problemas para su digestión, como deficiencia en nutrientes necesarios para el desarrollo de los microorganismos anaerobios, baja alcalinidad o excesivo contenido en sólidos que provoque problemas mecánicos. En este sentido, los residuos ganaderos, y en concreto los purines de cerdo, pueden ser una buena base para la codigestión.

7.1.5. Recuperación de nutrientes

En las zonas excedentarias en nutrientes, donde la producción supera a las necesidades de los cultivos, resulta imposible valorizar como fertilizante la totalidad de las deyecciones generadas. En este escenario deben plantearse, en primer lugar, estrategias de concentración y recuperación de nutrientes con el propósito de favorecer su transporte y uso en otras regiones geográficas con demanda de fertilizantes.

7.1.5.1. Concentración

El proceso de concentración puede realizarse mediante dos métodos genéricos distintos: físico y térmico. Los procesos térmicos son especialmente interesantes pues permiten aprovechar la energía térmica sobrante de un proceso de cogeneración a partir del biogás producido por digestión anaerobia.

Una separación inicial de fases permite gestionar de forma independiente las fracciones sólida y líquida de los purines, concentrando en la fracción sólida la mayor parte del nitrógeno orgánico así como del fósforo. Las eficiencias de separación dependen de la tecnología utilizada. La separación por membranas es aconsejable aplicarla únicamente cuando se disponga de efluentes muy diluidos. El uso de membranas es posible siempre y cuando se haya estabilizado previamente la materia orgánica y los sólidos hayan sido eliminados mediante un proceso efectivo de separación. Para retener el nitrógeno amoniacal puede ser necesaria la acidificación previa de los purines.

Los procesos térmicos unitarios susceptibles de ser aplicados para concentrar son la evaporación (aplicable a líquidos, con una concentración final del 20-30% en ST) y el secado (aplicable a sólidos, con una concentración final que puede superar el 90% en ST). Los procesos térmicos deben complementarse con otros para evitar el deterioro del material, la volatilización de los COV y el amoníaco y, en general, para conseguir la recuperación de recursos con el mínimo impacto ambiental. En este sentido, combinar la digestión anaerobia con la evaporación al vacío permite obtener unos condensados con una calidad muy superior a los obtenidos a partir de la evaporación de purines sin digerir. La combinación de la digestión anaerobia y la concentración térmica es la base del proceso VALPUREN aplicado en las dos plantas de tratamiento de purines existentes en Juneda (España), cada una con una capacidad anual de tratamiento de 110.000 toneladas. La Figura 4.4 muestra una de estas instalaciones.

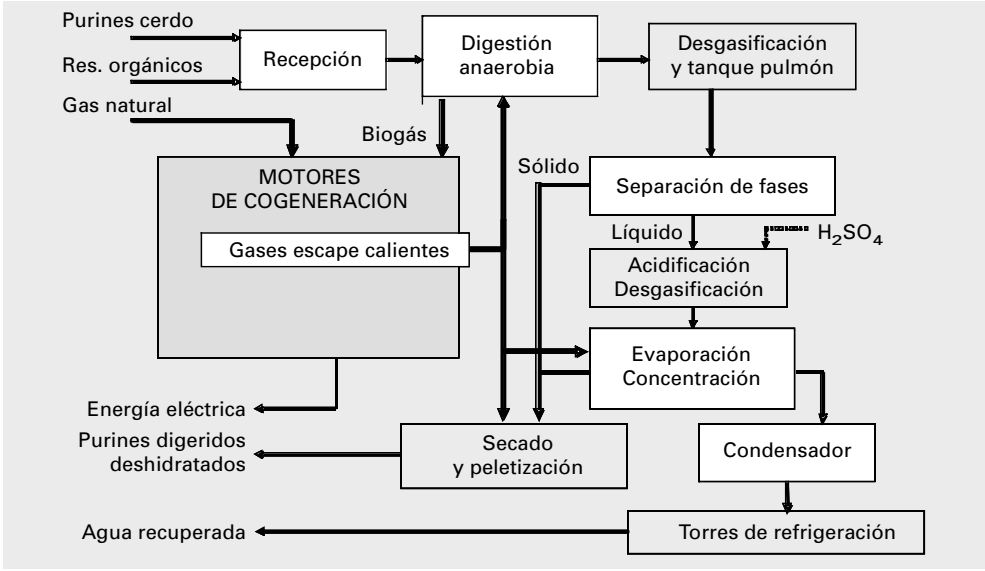


Figura 4.4. Esquema del proceso de tratamiento de purines VALPUREN.

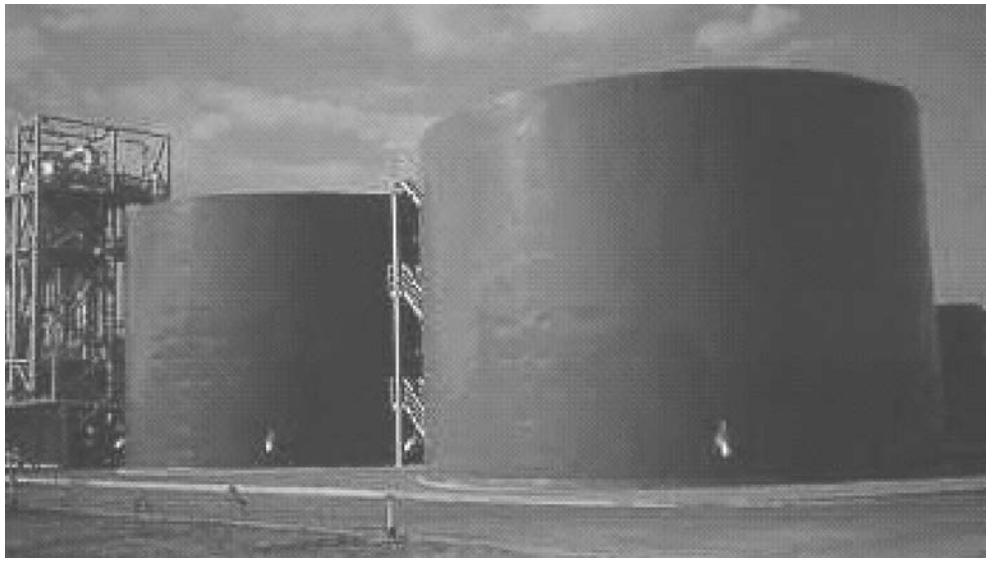


Figura 4.5. Vista de una planta de tratamiento de purines en Juneda (España) que aplica el proceso VALPUREN (en primer plano se visualizan los digestores anaerobios y detrás la unidad de evaporación al vacío).

La Figura 4.5 muestra una instalación de tratamiento de purines en la localidad ilerdense de Juneda (España).

En el punto 2 del DVD adjunto se muestra información sobre diversos sistemas de concentración de fangos y purines, básicamente relacionados con el secado.

7.1.5.2. Stripping-Absorción

El N-NH_4^+ contenido en los purines puede ser separado mediante arrastre con una corriente gaseosa. Este proceso se ve favorecido a elevados valores de temperatura y pH, condiciones a las que el equilibrio que muestra la ecuación ec. 1 se desplaza hacia la forma volátil, el amoníaco. El NH_3 recuperado puede entonces ser absorbido en una solución ácida, obteniéndose así una solución rica en nitrógeno amoniacal.

$$NH_4^+ + OH^- \xleftrightarrow{K_a} NH_3 + H_2O$$

$$pK_a = 4 \cdot 10^{-8} T^3 + 9 \cdot 10^{-5} T^2 - 0{,}0356T + 10{,}072 \quad \text{(ec. 1)}$$

Los purines son un sustrato complejo, pues si únicamente se incide sobre el pH su alta capacidad tampón implicará un alto consumo de reactivos. Por el contrario, la modificación exclusiva de la temperatura comportará una disminución del pH debido a la dinámica de los AGV. En este sentido, la combinación de la digestión anaerobia para eliminar compuestos orgánicos volátiles, y el *stripping* a 80 ℃, sin modificación del pH con posterior recuperación de sales amoniacales, se ha mostrado mucho más eficaz que el *stripping* de purines frescos.

7.1.5.3. Precipitación

Una posible estrategia a aplicar para la recuperación del fósforo es la precipitación, aunque su coste es muy elevado. Este proceso consiste en añadir reactivos ricos en calcio, generalmente CaO, o bien ricos en magnesio, para favorecer la precipitación de sales fosfóricas. Especial interés tiene la recuperación de la estruvita ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$) pues permite recuperar nitrógeno y fósforo simultáneamente.

7.1.6. Eliminación biológica de nutrientes

En un contexto de tendencia a cerrar ciclos, los procesos de recuperación de nutrientes deben priorizarse por encima de los de eliminación. A pesar de ello, condicionantes económicos, de localización, o bien dificultades para valorizar los productos recuperados pueden influir en la decisión del tipo de tratamiento a aplicar, haciendo aconsejable eliminar en lugar de recuperar. Los tratamientos de eliminación deberían realizarse siempre a partir de la fracción líquida del residuo, hecho que conlleva la necesidad de una separación de fases previa.

En un tratamiento para la eliminación de nitrógeno, el objetivo básico radicará en la transformación del N-NH_4^+ contenido en los purines a N_2. En el caso del fósforo no es posible plantearse una estrategia de eliminación biológica, únicamente de acumulación en la biomasa y posterior separación.

7.1.6.1. Nitrificación-Desnitrificación (NDN)

Se trata del sistema convencional para la eliminación biológica de nitrógeno de aguas residuales. Durante el proceso de nitrificación, el amonio es oxidado a nitrato (NO_3^-) por microorganismos autótrofos en presencia de oxígeno y carbono inorgánico. Este proceso conlleva también la formación de nitrito (NO_2^-) como intermediario (ec. 2-3). El consumo de alcalinidad asociado al tratamiento supone una disminución del valor de pH.

$$NH_4^+ + 1{,}5O_2 \rightarrow NO_2^- + H_2O + 2H^+ \qquad \text{(ec. 2)}$$

$$NO_2^- + 0{,}5O_2 \rightarrow NO_3^- \qquad \text{(ec. 3)}$$

En la desnitrificación, el nitrato es reducido por microorganismos heterótrofos a nitrógeno molecular en ausencia de oxígeno y presencia de carbono orgánico, siendo finalmente transferido a la atmósfera (ec. 4). Algunos efectos positivos del proceso combinado de NDN son: reducción de malos olores, eliminación de materia orgánica sin necesidad de aireación, estabilización, etc.

$$MO_{red} + NO_3^- \rightarrow MO_{ox} + 0{,}5N_2 \qquad \text{(ec. 4)}$$

Características de los purines como un elevado contenido en NH_4^+, una baja relación DQO/NH_4^+, o una composición fluctuante a lo largo del tiempo, pueden condicionar el éxito del tratamiento. A valores bajos de pH la nitrificación puede verse inhibida por la producción de ácido nitroso (HNO_2) mientras que, a valores altos, por la formación de amoníaco (NH_3). Así mismo, la escasez de materia orgánica puede convertirse en un limitante durante la desnitrificación para los organismos heterótrofos. Esta última consideración representa una limitación en el tratamiento del sobrenadante de purines previamente digeridos si no se considera el aporte externo de una fuente de carbono. A pesar de lograr buenos niveles de depuración, cuando el propósito final sea el de conseguir un efluente apto para ser vertido a cauce público, posiblemente sea necesario un tratamiento terciario de afinado.

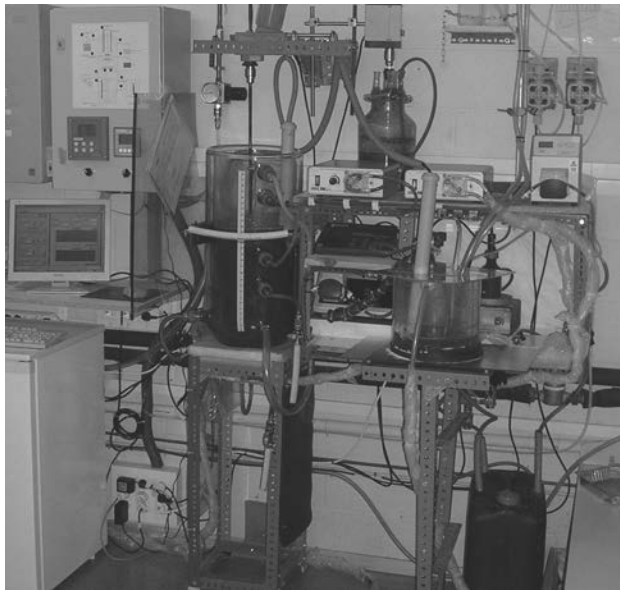


Figura 4.6. Unidad de tratamiento NDN a escala laboratorio operando en discontinuo (SBR).

A escala industrial, son conocidas numerosas experiencias de este proceso, ya sea operando en continuo o bien en discontinuo (Tilche *et al.*, 1999; Gurri, 2004). La principal diferencia entre ambos sistemas radica en que el funcionamiento de un sistema continuo está orientado en el espacio mientras que el de un sistema discontinuo lo está en el tiempo. En cuanto al consumo de energía, son habituales valores entre 10 y 25 kW · h por cada metro cúbico de purines tratado. La Figura 4.7 muestra una posible estrategia de tratamiento de purines basada en un proceso de nitrificación-desnitrificación.

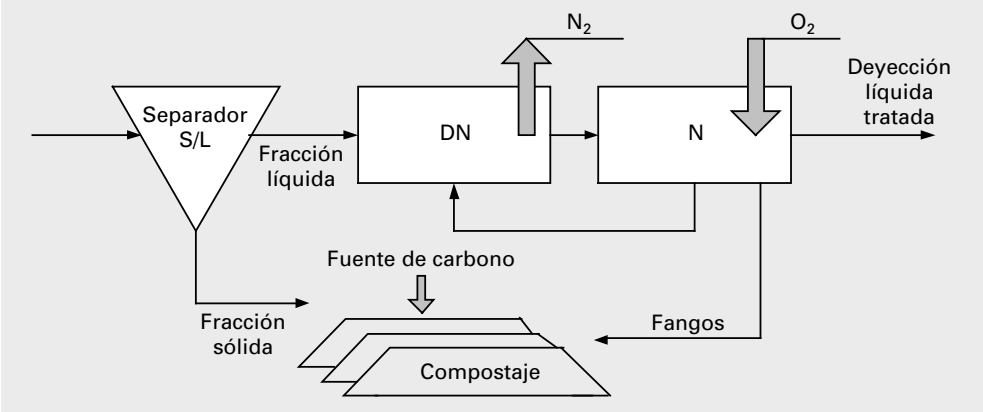


Figura 4.7. Esquema de estrategia de tratamiento basada en un proceso de nitrificación-desnitrificación.

Autores como Eum y Choi (2002) proponen realizar el proceso vía nitrito en lugar del habitual nitrato (nitrificación parcial) con el propósito de disminuir los requerimientos de oxígeno y materia orgánica. La operación de un sistema en estas condiciones necesitará de un mayor grado de control.

7.1.6.2. Proceso SHARON-ANAMMOX

El proceso combinado SHARON-ANAMMOX, acrónimos de *Single reactor system for High Ammonium Removal Over Nitrite* y *Anaerobic AMMonium OXidation*, es un nuevo proceso todavía en fase de desarrollo, y que permite eliminar el nitrógeno mediante biomasa totalmente autótrofa, sin requerimientos de materia orgánica. Se trata de una alternativa más sostenible que una NDN convencional, pues puede combinarse con un proceso de valorización energética como la digestión anaerobia. Otras ventajas de este proceso son el ahorro de oxígeno, la baja producción de fangos y la posibilidad de trabajar con cargas de nitrógeno más elevadas. Numerosos trabajos ya proponen el proceso SHARON-ANAMMOX para el tratamiento de la fracción líquida de purines a escala laboratorio.

7.1.7. Sistemas combinados. Estrategias integrales e integradas

Los procesos mostrados en la Tabla 4.9 pueden integrarse de diferentes formas para constituir estrategias de tratamiento, según muestra la Tabla 4.10, dependiendo de las características de la materia prima, los condicionantes del entorno y los objetivos a cumplir, es decir, dependiendo de las necesidades puestas de manifiesto por el plan de gestión.

Tabla 4.10. Algunas estrategias de tratamiento en función de la caracterización de la situación y de los objetivos particulares a cumplir (Flotats *et al.*, 2000)

Situación	Condicionante/objetivo	Estrategia/diagrama
Equilibrio anual entre producción y necesidades de los cultivos	A. Regulación de caudales (individual o colectivo)	1
	B. Cubrir necesidades específicas de los cultivos	1 → 2 → 1; 1 → 8
	C. Cubrir consumos propios de energía	7 → 1
	D. Modificar relación NPK	1 + 15
Excedente anual para el nitrógeno, equilibrio de los otros componentes	E. Eliminar parte del nitrógeno	1 → 2 → 5 → 4 → 1; 1
Excedente anual para el nitrógeno, equilibrio para otros componentes. Demanda del mercado de compuestos nitrogenados	F. Recuperar nitrógeno	1 → 7 → 2 → 15 → 13 → 1; 1
Excedente estructural en la zona y en zonas cercanas. Demanda del mercado de enmiendas orgánicas	G. Eliminar nitrógeno no orgánico. Obtener enmienda orgánica higienizada y paletizada. Depuración terciaria de la fracción líquida (17 puede no ser considerada)	1 + 3 → 2 → 5 → 4; 15 → 10; 8 → 17
Excedente estructural en la zona y en zonas cercanas. Demanda del mercado de fertilizantes minerales	H. Obtener un producto seco, de fácil transporte, mineralizado. Nitrógeno en forma amoniacal	1 → 7 → 2 → 15; 11; 12
Excedente estructural en la zona y en zonas cercanas. Excedente para la demanda de abonado de fondo. Necesidad de fertilizante mineral	I. Obtener un producto seco, de fácil transporte, mineralizado. Nitrógeno en forma amoniacal y nítrica	1 → 7 → 2; 4 → 15 → 12; 11

Algunos investigadores, como los que han intervenido en la redacción de parte de este capítulo evalúan económicamente algunas de estas posibilidades. Otros presentan algoritmos para la selección de la solución tecnológica más adecuada en función de cual sea el escenario.

La solución idónea, con sus variantes, depende básicamente del coste, el cual, a su vez, es función del caudal a tratar, los precios de la energía, las distancias y costes de transporte, y la conveniencia de un tratamiento colectivo.

En una situación de excedente de nutrientes, ya sea con gestión individual o colectiva, la solución tecnológica debe poder mejorar la gestión de las deyecciones, ya sea desde el punto de vista práctico de mejora del manejo, como económico de reducción los costes de transporte y aplicación.

En caso de excedencia de nutrientes, las soluciones tecnológicas se agrupan en tres grandes grupos:

- Las soluciones que adoptan la digestión anaerobia y aprovechamiento energético del biogás.
- Las soluciones que se basan en el tratamiento fisicoquímico, para el cual los nutrientes se recuperan en forma sólida.
- Las soluciones que adoptan un proceso de eliminación de nitrógeno.

7.2. RESIDUOS DE LA TRANSFORMACIÓN DE LA MADERA Y DE LA PRODUCCIÓN DE PAPEL, CARTÓN, PASTA DE PAPEL, TABLEROS Y MUEBLES (CÓDIGO 03)

Habida cuenta de que la mayor parte de estos residuos son polvos y virutas derivados del propio proceso de fabricación, la valorización resulta relativamente sencilla. Según la calidad de la madera residual, una aplicación muy extendida es la fabricación de tableros de aglomerado; en el caso del papel suele aplicarse en zócalos y bloques ligeros para el relleno de tabiques y puertas.

En algunos casos se procede a la valorización mediante su utilización como pasta de papel. También se usa como enmienda para la fabricación de compost. Por último, la opción de la valorización energética, en especial la gasificación, toma cada día mayor relevancia debido a que utilizan combustibles renovables como materias primas.

En el caso de la fabricación de pasta de papel, el residuo más importante es aserrín y corteza, cuya valorización ya se ha expuesto anteriormente. En la elaboración del papel, el residuo generado más destacable es el fango. Este fango obtenido puede someterse a deshidratación, pudiendo posteriormente destinarse a la fabricación de material cerámico ligero y árido expandido, o emplearse como combustible.

7.2.1. Residuos de la transformación de la madera y de la producción de tableros y muebles (código 0301)

Los residuos que se generan en estas ramas industriales corresponden, en su mayoría, a los restos de los materiales que resultan de sus procesos de manipulación. Es el caso los residuos de corteza y corcho, polvo, aserrín, virutas y recortes de madera y restos de aglomerados y sus derivados.

Los modos de gestión aplicables a estos tipos de residuos comprenden valorización y destrucción mediante incineración, o deposición controlada.

En algunos casos se valorizan dichos residuos mediante su utilización en la fabricación de pasta de papel. Otra opción es su valorización energética en instalaciones de combustión apropiadas (hornos de cerámica y análogos, y para producción de vapor y energía eléctrica, a cuyos efectos se consideran biomasa residual y pueden acogerse a los beneficios de la producción eléctrica en Régimen Especial). En este segundo caso hay que tener en cuenta que los residuos lignocelulósicos plantean importantes problemas de manipulación, debido fundamentalmente a su reducida densidad. Una solución para este problema consiste en proceder a su densificación o compactación mediante la formación de briquetas, con ayuda de los aglomerantes adecuados. Estas briquetas constituyen un producto de gran valor añadido y que se utiliza principalmente como combustible en usos domésticos.

7.2.2. Residuos de los tratamientos de conservación de la madera (código 0302)

La industria de la madera genera un segundo tipo de residuos, éstos especiales, derivados de los conservantes de la madera, de los que los más usados son la creosota y el pentaclorofenol. A los residuos generados a partir de dichos conservantes debe aplicárseles un tratamiento fisicoquímico de floculación con cal y posterior oxidación.

7.2.3. Residuos de la producción y transformación de pasta de papel, papel y cartón (código 0303)

La fabricación de la pasta de papel persigue en primer lugar la extracción de las fibras de las plantas madereras, a partir de las cuales se fabricará posteriormente el papel. Uno de los procesos empleados es el llamado *kraft* o al sulfato, en el que, mediante la cocción de la madera en un «licor» constituido por una mezcla de sulfuro e hidróxido sódicos, la lignina que une las fibras se descompone, y las fibras se separan y dispersan. La fabricación de la pasta se completa con las fases de lavado, blanqueo y secado final.

El proceso industrial propiamente dicho de fabricación del papel consiste en la obtención de una estructura en forma de lámina fina. Para ello se filtra la pasta preparada a partir de la suspensión de fibras, obtenida como se ha descrito (partiendo de madera) o bien partiendo de papel o cartón recuperados.

El primero tipo de residuos de la fabricación de la pasta de papel lo constituyen el aserrín y corteza obtenidos en la fase de preparación de la madera, que se gestionan como se ha explicado en el apartado anterior.

En el resto de las etapas se generan residuos consistentes en fangos de diversa naturaleza:

- Fangos de licores verdes.
- Fangos de blanqueo con hipoclorito o con cloro.
- Fangos de blanqueo sin cloro.
- Fangos de destintado de papel viejo para reciclaje.

En algunos casos es posible valorizar algunos de los productos químicos presentes en los fangos (sulfuro sódico, carbonato cálcico, etc.). Si no lo es, lo lodos deben someterse a tratamiento fisicoquímico (espesamiento, filtración y vertido, éste, si el proceso de caracterización lo exige, previa inertización por solidificación).

7.3. RESIDUOS DE LA INDUSTRIA TEXTIL, DEL CUERO Y DE LA PIEL (CÓDIGO 04)

El cuero se define como el tegumento proveniente de ganado vacuno y equino; la piel es el tegumento de ganado ovino, caprino, porcino y de animales exclusivos para la industria de la peletería. El tratamiento preliminar de los cueros y las pieles se hace en el matadero. Aquí es donde se genera la materia orgánica capaz de sufrir alteraciones microbianas.

El Capítulo 8 de esta obra completa esta parte desde la óptica de impacto ambiental.

7.3.1. El proceso de curtición de pieles desde una perspectiva ambiental

Las empresas de curtición de la piel (tenerías), como cualquier otra industria de producción y transformación, deben conseguir un proceso productivo eficiente, que pueda asegurar la calidad del producto final y un precio competitivo en un mercado cada vez más globalizado. Para ello es necesario, además de conocer a fondo el proceso productivo desde el punto de vista tecnológico, conocer también sus implicaciones medioambientales.

Las principales cargas ambientales de un proceso de curtición de pieles se pueden resumir en los siguientes puntos:

- En cuanto a consumos. Es especialmente elevado el consumo de agua (entre 20 y 40 m^3 de agua por cada 1.000 kg de piel salada procesada) y el de productos químicos utilizados (entre 400 y 600 kg por 1.000 kg de piel salada). Entre las sustancias químicas, las más perjudiciales, desde el punto de vista ambiental, son el sulfuro sódico, utilizado en la fase de pelambre, el sulfato amónico, empleado en el desencalado, y las sales básicas de cromo (III), usadas en la etapa de curtición de la mayoría de los procesos.
- Respecto a las emisiones cabe destacar las aguas residuales generadas durante el proceso, así como los residuos sólidos que provienen de la piel de partida, ya que sólo un 30-50% del peso de la piel salada se convertirá en producto final, mientras que el resto son residuos producidos en distintos puntos del proceso. El principal problema de las aguas residuales son sus elevados valores de DQO, que se reducen un 98-99% con la depuración, y la salinidad que, a diferencia del problema anterior, no puede solucionarse con la depuración.

La Figura 4.8 muestra un balance de flujos para un proceso convencional de una fábrica de curtidos de piel vacuna.

El proceso de curtición consiste en someter la piel en bruto a una serie de tratamientos químicos y mecánicos que permiten evitar la descomposición

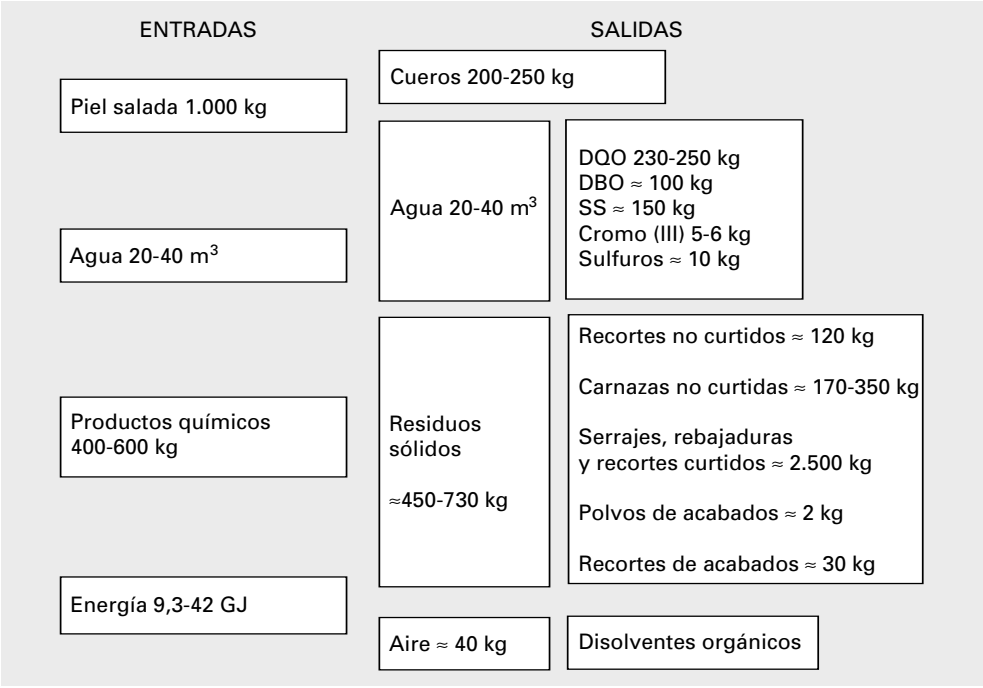


Figura 4.8. Flujos de entradas y salidas para un proceso convencional de curtición de piel vacuna. (Fuente: Guía de las mejores técnicas disponibles del sector curtidos. 2003).

natural del tejido, estabilizar químicamente la piel, dándole unas propiedades físicas que la hacen apta para diversos usos: confección, calzado, marroquinería, tapicería, etc.

La curtición de una piel requiere un laborioso proceso de trabajo que se puede establecer en varias fases de fabricación:

- *Operaciones previas.* La industria de la piel se inicia en el matadero, de donde las pieles son recogidas por los almacenistas, los cuales las preparan para el comienzo del proceso. La preparación de la piel comporta las operaciones de *clasificación,* el *recorte* de las partes de la piel no deseables para la curtición y *la conservación* de la piel hasta la entrada en proceso en la fábrica.

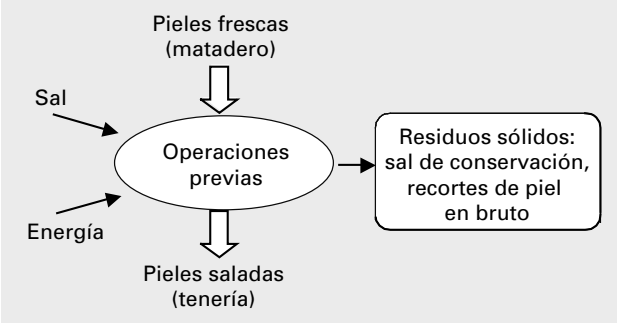


Figura 4.9. Operaciones previas: las realiza el almacenista y son previas a la entrada de la piel en la fábrica de curtidos.

- *Operaciones de ribera o fase húmeda.* En esta fase se engloba el conjunto de operaciones que requieren un mayor consumo de agua. La primera de ellas es el *remojo* que cumple con las funciones de limpiar la piel y rehidratarla después del proceso de conservación; a continuación se realiza el *pelambre*, donde se elimina el pelo, y, posteriormente, tienen lugar una serie de tratamientos químicos y físicos *(calero, descarnado, dividido, desencalado, rendido*) que preparan la piel para que los productos de curtición puedan penetrar adecuadamente en su interior. El sulfuro sódico usado en el pelambre es uno de los productos químicos más contaminantes de esta etapa; es por ello que se están desarrollando tecnologías que comportan la utilización de enzimas que reducen la cantidad de sulfuro necesaria.
- *Curtición.* Engloba las operaciones de *píquel* y la propia *curtición*, y tiene como objetivo principal conseguir un producto estable (estabilización del colágeno), evitando los fenómenos hidrolíticos causados por la presencia de agua y/o enzimas, y también dar a la piel una resistencia a la temperatura superior a la que presenta en estado natural. Otro de los objetivos es conseguir, mediante la reacción de los productos curtientes con el colágeno, un soporte adecuado para que las operaciones posteriores den

como resultado una piel con las características físicas requeridas para su uso posterior. El píquel detiene definitivamente la acción de los enzimas del rendido y prepara la piel para la posterior curtición. La operación consiste en el tratamiento de las pieles con soluciones salinas y ácidas en el mismo baño, generándose aguas residuales de pH bajo y con gran cantidad de sales disueltas. El producto curtiente por excelencia es la sal básica de cromo (III), que confiere a la piel unas prestaciones no conseguidas con otras sustancias curtientes, como los extractos vegetales y taninos en la curtición vegetal. Sin embargo, desde el punto de vista ambiental el cromo, aunque sea cromo (III), es un metal pesado y debe evitarse su utilización. Es por ello, que muchas de las investigaciones que se realizan actualmente son el estudio de su posible sustitución en el proceso, o al menos su minimización en las aguas residuales.

- *Operaciones de postcurtición.* Después de tener la piel curtida se introducen en ella diferentes productos que modifican sus propiedades en función del tipo de artículo que se desea. Estas operaciones son, entre otras: *recurtición,* que trata la piel curtida con nuevas sustancias de carácter curtiente, *tintura*, que da color a la piel, y *engrase*, que lubrica el cuero para darle la flexibilidad adecuada. También forman parte de la postcurtición las operaciones de *escurrido, estirado* y *secado* de la piel. La finalidad de esta fase es la de dejar la estructura interna de la piel en condiciones de ser un producto duradero y que cumpla los requerimientos de uso.
- *Operaciones de acabado.* Son el conjunto de operaciones basadas en el tratamiento superficial de la piel, para darle el aspecto final con que se comercializará. En esta parte del proceso las operaciones que se aplican son operaciones mecánicas de carácter físico y los residuos generados son principalmente emisiones a la atmósfera.

La Figura 4.10 sintetiza las fases de las operaciones descritas.

7.3.2. Efluentes líquidos. Recuperación de cromo

El sector de curtidos en Europa, y más concretamente en España, está pasando por momentos de reestructuración y ajuste. Los costes que debe afrontar la industria europea son infinitamente superiores a aquéllos que soportan otros países: China, India, Marruecos, etc., con bajos costes de mano de obra y legislaciones ambientales muy laxas o nulas.

Por ejemplo, en el caso del cromo, el límite exigido por la legislación europea para su vertido en las aguas residuales es de 2 mg Cr/l. Esto obliga a las empresas de curtidos a aplicar tecnologías de prevención de la contaminación y de recuperación del cromo de las aguas residuales.

Como continuación, desde el punto de vista técnico hay diferentes formas de conseguir una minimización de la cantidad de cromo en las aguas residuales (por ejemplo, usar baños cortos y temperaturas altas que permitan un mayor agotamiento del cromo del baño, etc.). Con la aplicación de estas tecnologías se consigue que las aguas de la etapa de curtición sólo contengan entre 0,5 y 1 g/l de concentración en óxido de cromo, en lugar de los 6-8 g/l que se obtienen en un proceso convencional. Estas aguas residuales correspondientes a la etapa de curtición son las que contienen mayor cantidad de cromo, el cual puede recuperarse y reutilizarse mediante alguno de los tratamientos que se describen seguidamente.

En las etapas posteriores a la curtición, sobre todo en el proceso de recurtición, tintura y engrase, también se desprenden pequeñas cantidades de cromo, insuficientes para poderlo precipitar o recircular. Este cromo llegará a la estación depuradora de aguas residuales industriales (EDARI), junto con todo el efluente residual.

Las alternativas actuales para la recuperación del cromo son las siguientes:

- Precipitación por homogeneización de las aguas residuales.
- Recirculación directa del baño residual.
- Precipitación y redisolución (con o sin filtración).

7.3.2.1. Precipitación por homogeneización de las aguas residuales

Al mezclar las aguas residuales procedentes de las fases de ribera y curtición, se obtiene un agua homogeneizada con un valor de pH entre 8 y 10, y una concentración entre 50 y 100 mg Cr/l. En las condiciones indicadas, como muestra la Figura 4.11, el cromo presente en las aguas residuales se encuentra

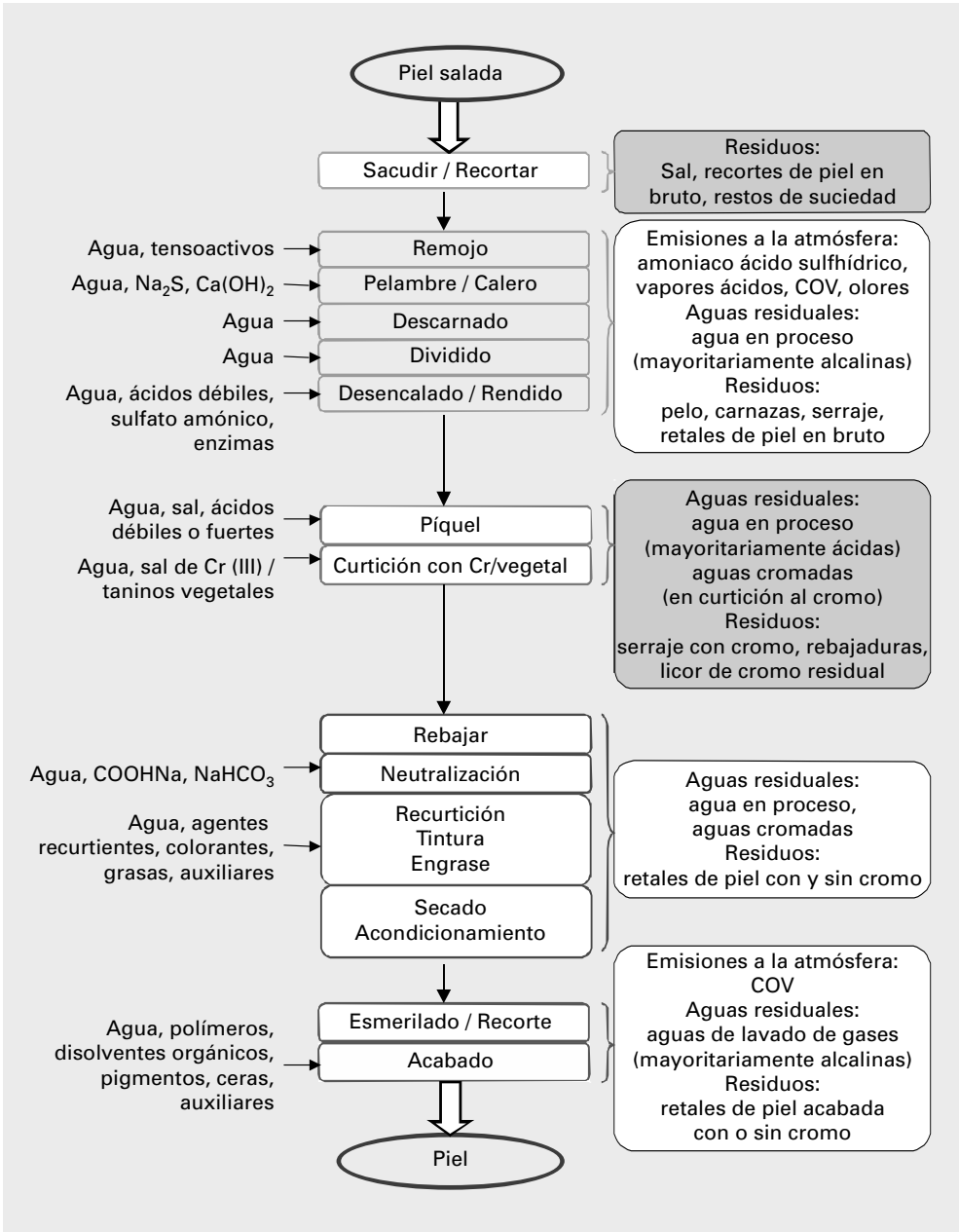


Figura 4.10. Proceso convencional de curtición por etapas y sus respectivas emisiones.

precipitado en forma de hidróxido de cromo hidratado, producto muy insoluble para valores de pH entre 6,5 y 10. Además de la precipitación de sales de cromo, la homogeneización hace precipitar proteínas y otros compuestos.

En teoría, la homogeneización permitiría respetar los valores de vertido que exigen las leyes de aguas residuales para el cromo, pero en la práctica resulta que el proceso de sedimentación no es tan eficaz como para asegurar la eliminación de todos los fóculos del agua residual, ya que una parte de los cuales puede encontrarse en forma coloidal. El contenido residual de sólidos en suspensión después de una buena sedimentación puede ser del orden de 200-250 mg/l. Como el lodo contiene entre un 2 y un 3% de cromo sobre el peso seco, el agua residual depurada tendrá entre 4 y 7 mg/l de cromo trivalente, valor superior al admitido.

El cromo presente en los lodos podría ser reutilizado en la propia empresa de curtición, previa redisolución con agua y ácido sulfúrico. De todas formas, con este proceso se obtendría un licor de cromo no muy limpio, que podría dar problemas en la etapa de curtición.

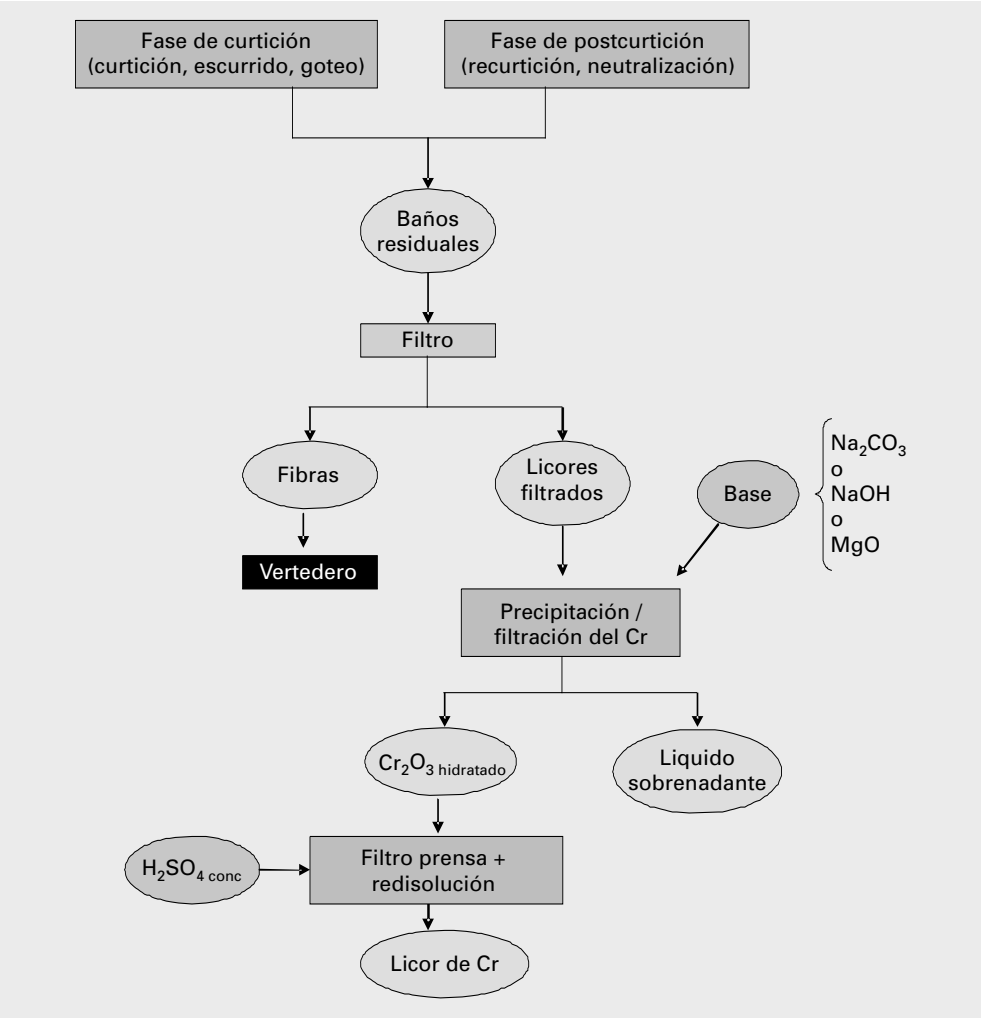


Figura 4.11. Diagrama del sistema de recuperación del Cr por precipitación después de la homogeneización de las aguas.

7.3.2.2. Recirculación directa del baño residual

Este sistema consiste, como esquematiza la Figura 4.12, en recircular el baño residual del proceso de curtición para preparar el siguiente baño de curtición al cromo. Es un método simple y económico, ya que casi no consume productos químicos. Cabe decir que, además de reducir la concentración en cromo, este proceso hace disminuir considerablemente la contaminación salina.

Para este proceso se requiere de una maquinaria específica. El bombo de curtición tiene que estar equipado con un canal de recogida del baño residual. Para eliminar las fibras de cuero de las aguas residuales es necesario pasarlo por un tamiz o un filtro; en algunos casos se separan los restos de grasas. Es también necesario un depósito para almacenar los licores ya filtrados, que sea capaz de resistir la corrosión que produce la salinidad y la acidez de los baños residuales y por último una bomba para

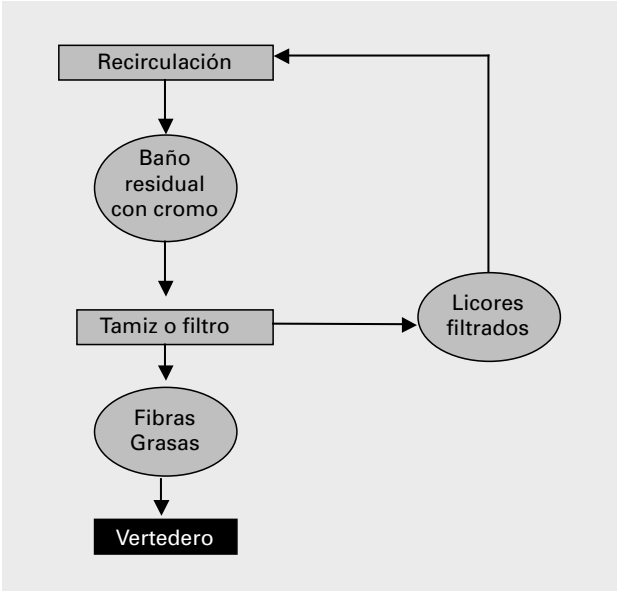


Figura 4.12. Diagrama del sistema de recuperación de Cr por recirculación del baño residual.

trasladar el licor otra vez hacia el bombo. Con este sistema se recupera alrededor del 60% del cromo residual. Antes de recircular los licores de cromo es necesario siempre controlar y ajustar la concentración salina, la del óxido de cromo y conocer el pH y la acidez del baño.

Este tipo de recirculación permite ahorros en consumos en el proceso de píquel-curtición del 90% de agua, el 50% de sal, el 20% de los ácidos, 14% de cromo y un 17% de agentes basificantes. Pero los ahorros más importantes se consiguen en la reducción de carga contaminante en los efluentes, esto es reducciones de:

- 18% en la conductividad de entrada de la EDARI.
- 30% en cromo en la entrada de la EDARI.
- 27% del cromo en los lodos de depuración.

Además, este tipo de instalación es de muy fácil manejo y requiere de poca infraestructura para funcionar; como consecuencia, su período de amortización es corto.

7.3.2.3. Precipitación y redisolución (con y sin filtración)

Este proceso esencialmente consiste en pasar los baños de curtición por un filtro para eliminar las fibras. Posteriormente se realiza la neutralización del baño con una base, hasta llegar a un pH comprendido entre 8 y 10 para que precipite el hidróxido de cromo hidratado. Este se deja sedimentar, se separa del líquido sobrenadante y se hace una redisolución del hidróxido de cromo hidratado con ácido sulfúrico concentrado.

Los álcalis más utilizados son el carbonato sódico, el hidróxido sódico y el óxido de magnesio. El volumen de los precipitados y la concentración de cromo varían según las condiciones de precipitación.

Dentro del mismo sistema existe la posibilidad de realizar una filtración del sedimento de cromo hidratado diluido para concentrarlo y poder preparar un licor de cromo que tenga un 10% en peso de óxido de cromo. Para concentrar el hidróxido de cromo hidratado se utilizan tambores de filtro rotativo al vacío y filtros prensa con placas.

El tambor rotativo proporciona unos lodos con un contenido de óxido de cromo del 5 al 6%. La ventaja, en cambio, de trabajar con un filtro prensa es que con menor cantidad de energía genera unos lodos que contienen un 11% de óxido de cromo. Esto representa que el licor de cromo, obtenido al final del proceso, contendrá una menor cantidad de sales minerales y sustancias orgánicas, así como un mínimo volumen de los licores recuperados, facilitando su reutilización. Trabajando con los filtros prensa se obtiene un rendimiento de la recuperación superior al 98%. La Figura 4.11 muestra el principio de funcionamiento.

Si en una localidad hay varias fábricas de curtidos, lo mejor es diseñar una única planta de tratamiento de los licores de cromo residuales. Esto ofrece la ventaja de que los costes de instalación y gestión serán inferiores, además de disponer de personal más cualificado y de aparatos más sofisticados, precisos y rápidos en el laboratorio. Es la solución adoptada por las empresas de curtidos situadas en Igualada (Barcelona). En esta planta centralizada, después de basificar y precipitar el cromo procedente de baños de diversas empresas, en forma de hidróxido de cromo, se separa el precipitado y se filtra con un filtro prensa.

El hidróxido de cromo prensado es llevado a los tanques donde se disuelve con una cantidad predeterminada de ácido sulfúrico concentrado obteniéndose así una disolución de sal de cromo. Posteriormente hay una última fase de refinamiento que consiste en tratar el licor de cromo obtenido con tierra de diatomeas y volverlo a filtrar con un filtro prensa con la finalidad de separar cualquier resto de proteínas cromadas o sales de calcio y magnesio insolubles. Este tratamiento proporciona al licor una gran transparencia que lo hace ser más apreciado por el curtidor. La fase de refino es interesante especialmente en plantas centralizadas en las cuales los baños residuales de cromo de diferente procedencia tienen que ser transformados en un licor comercial para otro cliente.

El licor de cromo refinado se almacena en grandes depósitos y después de los controles analíticos adecuados se le ajusta la concentración y basicidad para obtener siempre el mismo tipo de licor.

La tierra de diatomeas se lava con solución ácida para disolver el cromo. La solución es llevada al inicio de la planta de recuperación y la tierra de diatomeas lavada se deposita en un vertedero controlado, también puede valorizarse cerámicamente. Otra alternativa dentro del mismo método de recirculación, es aplicar un pulido con Rennovex, membranas basadas en una filtración a baja presión. En realidad, este proceso ha sido sometido a pruebas piloto, las cuales se realizan para pulir de grasas y proteínas el cromo redisuelto de una precipitación química con óxido de magnesio.

7.3.3. Residuos sólidos. Posibilidades de valorización

Los residuos sólidos que se generan en el proceso de curtición de una piel, se pueden clasificar en:

- Residuos que se podrían reducir en origen: sal y lodos de depuración con cromo. Se deben minimizar en origen estos residuos y luego valorizar el resto.
- Residuos que lleva la propia piel:
  - Retales salados (con pelo o lana).
  - Pelo/restos de lana.
  - Carnazas.
  - Emulsiones de grasa (piel ovina).
  - Recortes de tripa.
  - Serraje.
  - Recortes secos (curtidos en cromo).
  - Rebajaduras (cromo o vegetal).
  - Polvo de piel curtida (cromo o vegetal).
  - Polvo de piel curtida y teñida.
  - Recortes acabados (cromo o vegetal).

Para todos estos residuos, la mejor opción es la valorización, o el reciclaje, frente al vertido. Por lo tanto, lo que sí se puede hacer es intentar obtenerlos en las condiciones más adecuadas para poderlos valorizar mejor. Una de las posibilidades es la valorización energética, mediante incineración o gasificación, que puede ser aplicable a todos los residuos sólidos de tenería. Los restos de piel que contienen cromo, por ejemplo, pueden ser incinerados obteniendo una ceniza con un 50% de óxido de cromo. Este óxido de cromo tiene una naturaleza muy similar a las materias primas utilizadas para la industria productora de cromato sódico, el cual es el precursor de la mayoría de compuestos de cromo, incluyendo el licor de cromo usado en la curtición. En la Tabla 4.11 se muestra algunos de los residuos que se generan y su posible utilización.

- *Fangos de depuración.* Su principal problema es que contienen cromo (III) y no se pueden usar como fertilizantes. Estos fangos se depositan en un vertedero o se incineran bajo condiciones controladas. Las cenizas se pueden tratar para recuperar el cromo y reutilizarlo como materia prima.
- *Pelo.* El pelo se puede usar como fertilizante para agricultura, tanto en forma hidrolizada como directamente, sin hidrólisis previa. En este último caso debe mezclarse con otros residuos como el mosto de la uva, etc. Si no se realiza hidrólisis también se pueden aprovechar las propiedades fibrosas del pelo y fabricar fieltros o material para prevenir el crecimiento de las malas hierbas. En el caso de realizarse hidrólisis, esta puede ser: térmica, biológica (digestión anaerobia, enzimática, etc.) o química. Después de una hidrólisis química, se podría utilizar como sustituto de la caseína en acabados.
- *Carnazas*. De las carnazas se recuperan dos productos: la grasa, que se utilizará para aplicaciones industriales, y la proteína en forma de hidrolizado, que se utilizará principalmente como fertilizante. Otra posibilidad sería producir metano mediante digestión anaerobia en una planta de biogás. En este caso debería mezclarse con otros productos orgánicos.

Tabla 4.11. Posibilidades de valorización de los distintos residuos

	Residuos generados	Posible valorización
Residuos sin curtir	Sal	– Fundición. – Recirculación de baños. – Producción de hipoclorito. – Deshielo de las carreteras. – Reutilización en pieles.
	Recortes salados	– Grasas industriales. – Colas. – Hidrolizados proteicos.
	Pelo	– Fertilizante. – Fieltros u otros materiales fibrosos.
	Carnazas	– Fabricación de grasas industriales. – Hidrolizados proteicos.
	Recortes en tripa	– Grasas industriales. – Gelatinas. – Colas.
	Serraje	– Gelatinas. – Colas. – Fibra de embutido. – Serraje acabado, para usos similares a las de la piel acabada. – Masticables para perros.
Residuos curtidos	Rebajaduras	– Cuero artificial. – Hidrolizado de proteína. – Valorización energética.
	Recortes de piel acabada Polvo de esmerilado	– Valorización energética. – Hidrolizado proteico.
	Fangos	– Fertilizante (si no hay Cr). – Valorización energética.

- *Rebajaduras.* Si a las rebajaduras se les aplica una hidrólisis enzimática, el hidrolizado que se genera es de alta calidad y se obtienen proteínas y un fango de cromo, contaminado con proteínas. El hidrolizado se puede usar en la producción de recurtientes, como antiespumante, en la industria de conglomerado de madera, en la industria del yeso o se utiliza el hidrolizado proteico como aditivo para la fabricación de plásticos biodegradables. Los lodos de cromo se pueden reutilizar en plantas de reducción de dicromato para la producción de sulfato de cromo.

  Si se realiza una hidrólisis alcalina, se obtiene por una parte hidrolizado proteico y por otras sales metálicas. Según las condiciones de la hidrólisis se obtienen diferentes tipos de hidrolizados de colágeno que se pueden utilizar como fertilizantes. Por otro lado, con las sales metálicas se pueden obtener pigmentos para pinturas, pero antes hay que incinerar y tratar sus cenizas.
- *Serraje.* Es el residuo sólido más fácilmente valorizable, ya que se pueden obtener gelatinas de alto valor añadido, también se puede secar en moldes con diferentes formas para producir objetos masticables para perros, se pueden obtener colas y fibras para embutidos. En la Tabla 4.12 se muestra el método en que se gestionan algunos de los residuos del proceso de curtición y la finalidad y aplicación de cada modo de gestión.

7.3.4. MTD's aplicadas al sector de la curtición

Existen una serie de MTD's (mejores técnicas disponibles) para reducir los problemas derivados de los consumos de recursos o de las emisiones que se producen durante el proceso de curtición. Los puntos clave en los que se debe actuar son el consumo de agua y su uso adecuado, la sustitución de ciertos productos químicos y la reducción de los residuos.

Los principales impactos ambientales en las diferentes etapas del proceso de curtición se deben al elevado consumo de agua que se presenta en todas las etapas (remojo, descarnado, pelambre,..), a las características de las aguas residuales (elevada DQO,

Tabla 4.12. Posibilidades de valorización de los distintos residuos.

Modo de gestión		Residuos que se gestionan	Finalidad/aplicación	Observaciones
Valorización	Incineración.	Recortes en tripa, rebajaduras, fangos.	Obtención de energía y recuperación energética del cromo.	
	Biogás, biometanización.	Residuos no curtidos y fangos.	Producción de metano y utilización de éste como combustible. Según la técnica aplicada también se puede recuperar el cromo que contienen los lodos.	La carnaza se mezcla con residuos agrícolas, también con lodos de tenerías. El residuo sólido se puede utilizar como fertilizante (siempre que no contenga Cr).
	Gasificación.	Residuos curtidos en general y fangos.	Eliminación de residuos, recuperación del cromo y obtención de energía.	Las cenizas que se obtengan están formadas por un 65% de Cr_2O_3. Los lodos se han de secar antes de entrar en el horno.
	Plasma con vitrificación.	Todos los residuos.	Eliminación de residuos.	Los residuos han de ser triturados para obtener un tamaño adecuado para la alimentación del horno. Gran consumo energético.
Hidrólisis	Ácida	Carnazas.		Se realiza con ácido sulfúrico.
	Alcalina + incineración del residuo sólido.	Rebajaduras y serraje (residuos colagénicos cromados).	Separación de proteínas y sales metálicas. Recuperar la proteína y el cromo de los residuos curtidos y utilizar el cromo recuperado para sintetizar pigmentos.	
	Enzimática.	Carnazas, pelo, rebajaduras.	Obtención de gelatina y del hidrolizado proteico. Aplicación del hidrolizado proteico en la producción de plásticos biodegradables.	

alto contenido en sales, sulfuros, nitrógeno, etc.), a los residuos sólidos y a la emisión de malos olores.

La integración de las mejores técnicas disponibles en las diferentes etapas del proceso de curtición, proporcionan opciones de mejora y ventajas respecto al medio ambiente, siempre teniendo en cuenta la calidad final del producto deseado.

En las fases de *ribera:*

- En la etapa de *conservación* y *remojo* de las pieles es aplicable un enfriamiento de la piel, considerándolo como método de conservación a corto plazo, que puede realizarse por contacto con trozos de hielo, pasando las pieles por un tanque de glicol-agua fría añadiendo hielo al container, o bien utilizando unidades de refrigeración; también es aconsejable el uso de cuero fresco. Estos métodos exigen que las fábricas de curtidos estén cerca de los mataderos. El uso de las mejores técnicas disponibles en esta etapa permite la reducción del consumo de agua y la reducción de sal en las aguas residuales.
- En la etapa de *descarnado*, una mejor técnica consiste en realizar el descarnado después del remojo, de esta manera se reduce el consumo de agua y la utilización de productos químicos, de las etapas de pelambre y calero.
- En la etapa de *pelambre* es importante el uso de tecnologías que permitan la recuperación del pelo, reducir el consumo de sulfuros usando combinaciones de enzimas y aminas, y reciclar los baños de sulfuros si previamente han sido filtrados. Con dichas técnicas se consigue reducir la carga contaminante de las aguas residuales y evitar malos olores.
- En la etapa correspondiente al *desencalado* y *rendido* de la piel, es eficaz una sustitución de las sales amónicas utilizadas en el proceso tradicional de desencalado por dióxido de carbono o bien por ácidos débiles. Existen desventajas en el caso de usar CO_2, ya que el proceso es más largo en tiempo que el convencional, aunque hay un ahorro de efluentes, y en el caso de utilizar ácidos débiles se reduce el nivel de nitrógeno en las aguas residuales aunque puede aumentar la DQO.

En las fases de *curtición:*

- En el píquel, es necesario optimizar el baño, reciclando y reutilizando licores de píquel previamente controlados, y también hacer el píquel con baños cortos. Este método puede ser inadecuado para cierto tipo de piel, ya que puede influir en su calidad final.
- Curtición al cromo. Se debe aumentar el rendimiento del proceso de curtición, es decir, que la mayor parte del cromo ofertado en el baño, quede absorbido en la piel, para ello existen acciones de mejora tales como modificar parámetros del proceso (volumen de baño, pH, temperatura, velocidad del bombo) o alargar el tiempo de proceso para facilitar la penetración de los productos curtientes. Estas medidas deben realizarse en combinación con una recuperación del cromo en plantas especializadas.

  Modificar etapas previas también puede ayudar en la etapa de curtición, un calero en profundidad ayuda a la fijación del cromo, y el dividido permite mejorar la penetración. Existen métodos para conseguir un alto agotamiento del baño, usando productos curtientes modificados de forma que penetren mejor, o usando productos curtientes especiales (ácidos aromáticos dicarbónicos) que aumenten el número de grupos reactivos del colágeno donde se fija el cromo.
- Curtición al vegetal: Utilizar métodos que den alto rendimiento, empleando baños cortos consiguiendo una buena penetración de los agentes tánicos. El sistema Liritan, consiste en piquelar y precurtir la piel con ácido sulfúrico y polifosfatos antes de proceder a la curtición. Este método tiene la desventaja de que requiere un tiempo largo de ejecución.

En las fases de *postcurtición:*

- En las etapas posteriores a la curtición, es necesario un agotamiento de los productos químicos utilizados, mediante la optimización de los procesos, y reduciendo al máximo el agua en las etapas anteriores al secado, para facilitar y economizar dicha operación.

En las fases de *acabado:*

- En las etapas de acabado de las pieles, los principales impactos ambientales residen en la generación de polvo en las operaciones de batanado y esmerilado de las pieles, y también en las aplicaciones superficiales que recibe la piel en el propio acabado, obteniéndose compuestos orgánicos volátiles (COV's). Para ello deben aplicarse técnicas de captación de polvos y disminución de emisiones.

Se puede usar la máquina tipo Roller donde la solución de acabado se deposita mecánicamente en la superficie de la piel, acabados de cortina para acabados con film grueso, equipos de pulverización que utilizan gran cantidad de aire a baja presión consiguiendo un efecto de rebote menor y ahorro en productos químicos y pistolas de pulverización «air-less».

7.3.4.1. Técnicas emergentes en el sector de la curtición

Las nuevas técnicas para la prevención y control de la contaminación, que actualmente están en fase de estudio y/o desarrollo en el sector de la curtición de pieles, se encuentran relacionadas en la Tabla 4.13.

- *Conservación*. Se siguen estudiando distintas posibilidades de conservación en frío, ya que no se ha conseguido evitar totalmente el uso de sal en la conservación de pieles que deban pasar un período de tiempo superior a los 3 días antes de empezar su proceso de curtición.
- *Pelambre/calero*. Deben seguir las investigaciones en productos alternativos al sulfuro (enzimas, aminas de bajo peso molecular, etc.), ya que no se ha conseguido todavía una sustitución total de éste.
- *Aplicación de fluidos supercríticos en el desengrase*. Los fluidos supercríticos muestran sus propiedades de disolvente cuando son comprimidos a densidades iguales a los líquidos; pruebas realizadas demuestran que grasas y aceites pueden ser extraídos de materias animales. Esto posibilita su uso en la industria del curtido como desengrasante, especialmente de pieles más grasas, como la de cordero. Las ventajas medioambientales son:
  - Permiten la extracción de grasas y aceites en cueros y pieles sin curtir, y además evitan la necesidad de disolventes orgánicos y detergentes.
  - No se formaran aguas residuales en este proceso.
  - Recuperación de grasa.
- *Curtición orgánica*. La utilización de curticiones orgánico-sintéticas a base de resinas poliméricas de melamina-formaldehido (solas o en combinación con agentes de curtición vegetal) como sustitutos del cromo en la curtición de pieles. La principal ventaja medioambiental es la sustitución de cromo como agente de curtición.
- *Acabado libre de disolvente*. El uso de disolventes en las capas de fijación y en especial para efectos especiales en el acabado de la piel es muy común. La utilización de acabados libres de disolvente (base acuosa) o bajos en disolvente está incrementándose. Se han identificado acrilatos y poliuretanos, mediante híbridos entre estos polímeros y auxiliares que permiten este tipo de acabados. Las principales ventajas medioambientales son que no se usan compuestos orgánicos volátiles y no hay emisiones al aire.
- *Acabado electrostático*. Consiste en la aplicación de una capa en forma de polvo fino cargado electrostáticamente (resinas, pigmentos, reticulantes, etc.), la cual queda retenida sobre la superficie de la piel y al aplicarle posteriormente cierta temperatura, se forma una película por reticulación. La principal ventaja ambiental es que no se usan disolventes orgánicos, ni acuosos y no hay emisiones al aire.

Tabla 4.13. Técnicas emergentes.

Etapa de proceso	Técnica en estudio/finalidad
Conservación	– Sustitución de la sal de conservación.
Pelambre/calero	– Sustitución del sulfuro.
Desengrase	– Aplicación de fluidos supercríticos.
Curtición	– Curtición orgánica/sustitución del Cr.
Acabado	– Acabado libre de solvente. – Acabado electrostático.
En varias etapas del proceso	– Técnicas de membrana. – Uso de enzimas.

Igualmente, en varias etapas del proceso se pueden aplicar técnicas de membrana. Debido al rápido desarrollo del rendimiento de las membranas existentes, así como la reducción continuada de su costo, la aplicación de dicha técnica en la industria del curtido está experimentando un aumento de investigaciones para su uso. Las aplicaciones pueden ser: recuperación y reciclado de licores usados, recuperación de aceites y reciclado de tensoactivo del desengrase acuoso, aplicación de membranas dinámicas para el tratamiento de efluentes, y resaltar el tratamiento biológico usando membranas para filtración de biomasa y oxigenación. Las ventajas ambientales son diversas:

- Reducción en productos químicos, reducción en consumo de agua y de la cantidad de efluentes en el reciclado de licores del proceso.

- En el tratamiento de efluentes se aumenta el rendimiento y, a la vez, se minimiza la formación de fangos.

También pueden emplearse enzimas. El uso de enzimas estables en medio alcalino o neutro es común en las operaciones de remojo, pelambre y rendido. Se llevan a cabo investigaciones para aplicar lipasas en el desengrase de corderos, pues se piensa que sus posibilidades no están totalmente explotadas debido a sus limitaciones técnicas.

La investigación del uso de enzimas se lleva a cabo en las siguientes áreas:

- Aplicación de celulasa, para eliminar el estiércol de las pieles y cueros.
- Aplicación de una proteasa específica y keratinasa, para lograr un pelambre libre de sulfuros.
- Aplicación de lipasas en el postremojo, después del pelambre y descarnado para dispersar y eliminar la grasa natural.
- Aplicación de una lipasa ácida y una proteasa en píquelado y *wet-blue*[1], para rendido y desengrase de cueros y pieles.

Las ventajas medioambientales son que las enzimas, a causa de su poder biológico catalizador, producen una reducción de productos químicos en el proceso y la carga contaminante de los efluentes; además, el empleo de lipasas para el desengrase elimina la necesidad de usar disolventes y tensoactivos.

7.4. RESIDUOS DEL REFINO DE PETRÓLEO, PURIFICACIÓN DEL GAS NATURAL Y TRATAMIENTO PIROLÍTICO DEL CARBÓN (CÓDIGO 05)

Los residuos generados por esta rama industrial son, en su mayoría, *sólidos* (alquitranes azufrados, tierras contaminadas con hidrocarburos pesados, etc.) y pastosos (lodos de fondo de tanque, también generalmente con altos contenidos de azufre y otros contaminantes), dado que los *líquidos* resultantes del fraccionamiento del petróleo son, en su práctica totalidad, productos con valor comercial, es decir, fácilmente valorizables. Así, entre los residuos líquidos de esta industria, solo cabe citar a las emulsiones hidrocarburo/agua y a muy contados productos hidrocarbúricos no aprovechables.

Dado que tanto los residuos sólidos como los pastosos antes citados son de incineración problemática debido a la los contaminantes que contienen (azufre, derivados clorados, metales pesados, etc.), es en general preferible, básicamente por razones económicas, su inertización o solidificación mediante tratamiento con morteros de cemento y coadyuvantes, seguida de su vertido en instalaciones para residuos no especiales.

Si el contenido en contaminantes de dichos residuos permite su incineración sin causar problemas medioambientales, es, sin embargo, preferible acudir a ella por el hecho de conllevar una valorización energética. En el caso de emulsiones, puede ser necesario, previamente a la incineración, concentrar el residuo en componentes combustibles por alguno de los tratamientos fisicoquímicos *ad hoc* (decantación, centrifugación, etc.).

No hay que olvidar, asimismo, la posibilidad de recuperar por destilación, con un coste energético bajo, las fracciones hidrocarbúricas de bajo punto de ebullición («naftas ligeras»), reutilizables como disolventes o como combustibles limpios y de alto poder calorífico, o bien susceptibles de *cracking* térmico en la propia industria petroquímica para producir hidrocarburos gaseosos combustibles (del metano al butano), que constituyen el llamado gas manufacturado.

7.4.1. Agua de lastre

Actualmente cerca del 80% del transporte mundial de mercancias se realiza en parte o en su totalidad por medio de buques, siendo el mayor porcentaje (2/3 partes) correspondientes a mercancias a granel; y de este total más del 50% se corresponde al comercio mundial de combustibles, petróleo y carbón.

Durante el desarrollo del transporte naviero siempre se han lastrado los buques con cargas secundarias, materiales inertes como arena, rocas, hierro, etc., con el objeto de conseguir el calado adecuado en función de las condiciones de carga y navegación. Por esta razón, en los buques modernos el agua de lastre es absolutamente esencial para la seguridad y la eficiencia de operación de la mayor parte de los barcos, convirtiéndose esta agua en el principal vector de introducción de especies no deseadas en nuevos ambientes, llegando a provocar en algunos casos

[1] Nombre usado para designar la piel inmediatamente después de la etapa de curtición al cromo (cuando todavía está húmeda y tiene un color azul-verdoso debido al cromo).

la desaparición de especies nativas con la consiguiente problemática ecológica y medioambiental. Se estima que aproximadamente 12.000 millones de toneladas de aguas de lastre se transfieren anualmente, con unas 7.000 especies biológicas transitando en estas aguas diariamente.

Generalmente las operaciones de lastrado y deslastrado se realizan simultáneamente con las operaciones de carga y descarga, con el doble objetivo de mantener la cubierta del buque y sus medios de carga dentro de los márgenes operativos, a la vez de controlar los esfuerzos cortantes y momentos flectores del casco por debajo de los límites máximos admisibles. El agua de lastre se introduce por gravedad, desde las tomas habitualmente situadas en el fondo, hasta el nivel de agua exterior y luego por bombeo hasta las zonas precisas.

La normativa actual establece que se debe realizar un cambio de lastre en alta mar para evitar el transporte de materiales y organismos en puerto, para lo que actualmente se realizan operaciones como el cambio de agua secuencial, que tropieza con importantes problemas estructurales; y el cambio por dilución, en el que se hace rebosar el lastre por bombeo continuo en alta mar un mínimo de tres veces el volumen de los tanques.

Las cantidades de agua de lastre embarcadas pueden variar desde unos cientos de toneladas para buques pequeños, hasta más de cien mil toneladas en los buques de gran porte. Este transporte horizontal de agua constituye una forma de contaminación de aguas, a la vez que se constituye en un importante problema de vectorización y biomezcla al arrastrar formas de vida vegetal y animal, superior, protozoario, bacteriana y vírica en distintos estadios de su ciclo vital. Estudios realizados han puesto en evidencia que este trasiego llega a involucrar de 3.000 a 4.000 especies, de las que únicamente se han identificado 500; con una concentración de más de 50.000 ejemplares de zooplancton por metro cúbico, 100 millones de fitoplancton, miles de ejemplares de macro fauna y millones de precursores viables retenidas en los sedimentos de lastre que, antes o después, son total o parcialmente removidos en las operaciones de achique.

Los componentes principales que se pueden encontrar en el agua de lastre son:

- Sedimentos, incluidos organismos y partes gestantes de fito y zooplancton.
- Fitoplancton.
- Zooplancton, como larvas de mejillones, crustáceos y peces. Un ejemplo claro y actual es la diseminación del mejillón cebra.
- Bacterias, como *vibrio cholerae* y otros agentes infecciosos tipo dinoflagelados tóxicos. Los principales problemas causados se deben a que son organismos patógenos para el humano y que las bacterias sulforreductoras aceleran los procesos de corrosión.
- Virus.

Es así que la transposicion de especies se convierte en un problema mucho más dificil de abordar que el problema derivado de la contaminación fisicoquímico y microbiológico, ya que muchas de éstas tienen una gran capacidad de dispersión, readaptación y distorsión del entorno receptor.

Para el control de las aguas de lastre se pueden tomar medidas preventivas y/o correctivas, siendo las segundas mucho más costosas y complejas de llevar a cabo. En este aspecto la Organización Maritima Internacional recomienda:

- Minimizar los organismos embarcados durante el lastrado.
- Minimizar los sedimentos en los tanques de lastre, los cuales podrían encubrir microorganismos.
- Tomar medidas en el tratamiento del agua de lastre, incluyendo el cambio de lastre en alta mar.

Todas estas posibles soluciones al problema son simples en concepto; pero muy complejas al momento de llevarlas a la práctica.

La legislación actual no obliga a implantar un sistema de tratamiento de aguas de lastre siempre que se pueda realizar un cambio volumétrico con una eficacia del 95%; y si el intercambio se realiza por bombeo, se debe bombear tres veces el volumen de cada tanque para llegar a este rendimiento. Este intercambio de agua de lastre o «*ballast water exchange*» (BWE) no puede ser realizado en travesías cerca de la costa y tampoco bajo circunstancias de fatiga estructural del casco.

Alternativamente se ha intentado comprobar la aceptación de un sistema de tratamiento de agua de lastre o «*ballast water treatement*» (BWT) como opción para mejorar la eficacia del BWE.

Los costes operacionales para un sistema BWE son mayores que en un sistema BWT; pero el sistema BWT tiene una inversión fija mayor significando un coste global mayor, en compensación, un sistema BWT representa ventajas financieras adicionales de-

bido a la reducción del sedimento en los tanques de los buques. El sistema BWT no es aplicable a los buques con un tamaño menor a las 1.000 t de peso muerto, y teniendo en cuenta que la vida útil de un buque se estima en 25 años, en barcos de más de 10 años esta alternativa ya no es rentable.

Existe una amplia variedad de opciones de tratamiento propuestas con carácter general y que se pueden clasificar en:

• *Tratamientos primarios*: son de tipo mecánico que se basan en la separación líquido-sólido como la sedimentación y la filtración en sus diversas variantes. Son procedimientos eficaces en la región de 100 a 200 μm (macrobiota, diatomeas y dinoflagelados); pero ineficaces o inútiles en la reglón de los cuerpos plásticos o de los microbios (bacterias, 0,5-5 mm, virus 200 nm). Las dos técnicas más utilizadas actualmente como tratamiento primario son la filtración y la separación ciclónica.

• *Tratamientos secundarios*: pueden ser de tipo químico, térmico o mecánico. Los tratamientos químicos implican el uso de agentes biocidas de vida corta que no representen una posibilidad de contaminación subsidiaria. Los procedimientos térmicos se basan en la calefacción principalmente utilizando los escapes de la planta propulsora del buque o el circuito de refrigeración de las máquinas. El uso de ultrasonidos se incluye en esta categoría produciendo vibración en los líquidos causando efectos químicos o físicos intra y extracelulares capaces de destruir organismos y también partículas coloidales. La radiación UV también se considera en esta categoría y causa la ruptura de enlaces químicos entre las hebras de DNA celular interrumpiendo la replicación normal de los organismos. Se estima que la radiación UV es una opción válida con caudales de insumo de lastre entre 2.000 a 3.000 t/hora; para caudales superiores a 20.000 t/hora los aditivos químicos parecen ser la mejor opción.

7.5. RESIDUOS DE PROCESOS QUÍMICOS INORGÁNICOS (CÓDIGO 06)

La industria química inorgánica comprende un número considerable de procesos, de los que los más importantes por su carácter de básicos y por las cantidades puestas en juego son la industria del cloro y sosa cáustica, y las de obtención de ácidos como el sulfúrico, clorhídrico y nítrico, álcalis como la sosa y potasa, abonos minerales como los superfosfatos y sales y óxidos de metales pesados, extensamente empleados unas y otros como pigmentos de pinturas.

Los residuos de este conjunto de procesos se pueden agrupar en las siguientes categorías:

- Soluciones ácidas y básicas con bajos contenidos de sales y metales.
- Soluciones salinas y sales sólidas sin metales.
- Soluciones salinas y sales sólidas con metales.
- Lodos de filtración.
- Lodos y colas de destilación.

Catalizadores, materiales adsorbentes y filtrantes y resinas de intercambio iónico impregnados o contaminados con metales y sales metálicas

Las soluciones ácidas y básicas y las salinas se tratan por procedimientos fisicoquímicos de nuetralización y/o precipitación/decantación. En el caso de las ácidas y básicas, unas y otras pueden valorizarse empleándose para neutralizarse mutuamente, siempre que no contengan otros compuestos susceptibles de sufrir reacciones colaterales indeseables.

Otro ejemplo de valorización lo constituye la concentración de soluciones de ácidos minerales por electrodiálisis, que puede llegar hasta un factor de 100, obteniéndose por consiguiente concentraciones del orden de las habituales en el comercio y que por tanto confieren a los productos correspondientes un valor análogo a los de producción primaria.

Las soluciones salinas pueden también valorizarse, concentrándose por métodos como la ósmosis inversa, electrodiálisis e intercambio iónico, hasta llegar a grados de concentración que pueden llegar a permitir la separación y recuperación de la sal sólida por cristalización.

Algunas de dichas soluciones salinas ~~las~~ de cationes nutrientes para los vegetales (potasio, amonio) ~~p~~pueden neutralizarse con ácido fosfórico. Dado que el fósforo es otro de dichos nutrientes, las sales fosfóricas obtenidas constituyen un abono mineral.

Existe un cierto número de productos en principio residuales de los procesos reseñados que también es susceptible de valorización mediante su utilización como materias primas o reactivos secundarios (óxido e hidróxido cálcicos impurificados, utilizables como reactivos de neutralización de ácidos o como agente precipitante de metales pesados como hidróxidos; dióxido de carbono impurificado utilizable como neutralizante de álcalis, cloruro sódico residual de neutralización de gases ácidos, utilizable a su vez

como materia prima para la obtención de cloro, sosa cáustica o carbonato y bicarbonato sódicos, etc.).

Un tipo de residuos encuadrable en este grupo que merece mención aparte son las soluciones o sales sólidas cianuradas, dada su toxicidad (inferior, sin embargo, a otros como el ión mercúrico). Los cianuros son fácilmente oxidables mediante hipocloritos a productos en el mejor de los casos perfectamente inocuos (nitrógeno molecular, dióxido de carbono y cloruros):

$$2CN^- + 4ClO^- \rightarrow 2CO_2 + N_2 + 4Cl^-$$

Además de dichos reactivos, pueden emplearse para la llamada decianuración otros oxidantes tales como ozono, peróxidos, aire húmedo, agua supercrítica, permanganatos, etc.

Asimismo, dada la ya citada facilidad de oxidación de los cianuros, un simple tratamiento térmico en atmósfera oxidante es suficiente para transformarlos en los gases inocuos antes citados (CO_2 y N_2):

$$2\ CN^- + 2\ O_2 \rightarrow 2CO_2 + N_2$$

En cuanto a los residuos con metales, suele ser posible su valorización como tales, bien recuperándolos por intercambio iónico o por electrólisis (o, dicho en términos más precisos, por electrodeposición catódica).

En caso de no serlo, ya sea por razones técnicas o económicas, y dada la toxicidad de gran parte de los iones metálicos, debe acudirse a su precipitación en forma de hidróxidos o sales insolubles. Puesto que se trata de reactivos que conjugan de forma satisfactoria economía, insolubilidad de sus compuestos metálicos y agresividad química, se emplean casi exclusivamente el hidróxido cálcico para la precipitación primaria y los sulfuros solubles (sódico o amónico) para la secundaria. Los lodos obtenidos deben, generalmente, someterse posteriormente a un proceso de inertización previo a su vertido.

Merece también mención aparte el caso del mercurio, cuya alta toxicidad en su forma de ión mercúrico se ha comentado. La vía fisicoquímica de transformarlo a su forma elemental, en la que es mucho menos tóxico dada su inmiscibilidad con el agua, consiste en la reducción de sus sales con reactivos enérgicos como el borohidruro sódico, Na_2BH.

Los metales contenidos en catalizadores y adsorbentes (en su inmensa mayor parte carbón activo) pueden, si los procesos correspondientes son técnica y económicamente viables, recuperarse por disolución ácida y por desorción térmica (*stripping*) respectivamente. Los contenidos en las resinas intercambiadoras de iones pueden extraerse de ellas también por disolución ácida o bien por regeneración de la resina primitiva mediante corriente de salmuera o baño ácido o alcalino, según el caso. Si la recuperación no es viable, debe acudirse, también en este caso, a la inertización por solidificación y posterior vertido (o a la incineración, en el caso de las resinas intercambiadoras orgánicas combustibles).

7.6. RESIDUOS DE PROCESOS QUÍMICOS ORGÁNICOS (CÓDIGO 07)

La enorme variedad de procesos y de productos encuadrables en este apartado imposibilita una descripción exhaustiva de ellos y de sus residuos. Sin embargo, se quiere poner de manifiesto que los más significativos de éstos son los siguientes:

- Residuos con disolventes halogenados.
- Residuos con disolventes no halogenados.
- Aguas madres, baños y soluciones líquidas fenólicas y de otros compuestos orgánicos hidrosolubles.
- Dispersiones y soluciones acuosas poliméricas.
- Colorantes, tintas y pigmentos orgánicos y sus baños de aplicación.
- Residuos de pesticidas y biocidas.

Los residuos con disolventes (eventualmente previa una separación mecánica de soluciones acuosas acompañantes), ya sean halogenados o no, son generalmente valorizables, a un coste energético razonable, mediante destilación (en algunos casos, como el del percloretileno, se alcanzan proporciones de recuperación superiores al 95% de la cantidad inicial). Además, se puede recuperar el cloro de los disolventes que lo poseen en su molécula mediante el proceso de clorólisis.

En cuanto a los tratamientos destructivos aplicables a este grupo de productos, su combustibilidad y altos poderes caloríficos conducen a que la elección sea la incineración, siempre y cuando las emisiones de contaminantes contenidos en sus gases de combustión sean inferiores (o puedan reducirse por los sistemas de depuración de la instalación donde se incineren) a los valores admitidos por la normativa. Este aspecto debe cuidarse especialmente en el caso de los disolventes halogenados, cuya incineración produce los hidrácidos de sus halógenos correspondientes (básicamente los ácidos clorhídrico y fluorhídrico).

Las aguas madres, baños y soluciones líquidas fenólicas y de otros compuestos orgánicos hidrosolubles pueden valorizarse energéticamente si la concentración en sustancias combustibles es suficiente. Otra posible vía de valorización, ésta material, consiste en la absorción en resinas, que permite la regeneración de éstas y la recuperación consiguiente del producto. En cuanto a los tratamientos fisicoquímicos destructivos aplicables a estos productos, todos ellos se basan en su oxidación, ya sea biológica, por ozono, aire húmedo, peróxidos, etc. Si se precisa eliminar estos productos incluso a nivel de trazas (por ejemplo, en potabilización de aguas) debe recurrirse a la adsorción en carbón activo.

Las dispersiones y soluciones poliméricas no son, en general, valorizables, dada la imposibilidad de retrogradar la polimerización. Por otro lado, su escasa concentración en sustancias orgánicas combustibles conlleva a que su tratamiento por incineración directa presente inconvenientes análogos al de las emulsiones agua-hidrocarburos.

Sin embargo, su característica de ser análogas a las emulsiones permite tratarlas por separación de fases mediante rotura de la estabilidad de la dispersión, con el empleo de electrólitos. Procediendo así, se obtienen dos fases: una acuosa, que precisará tratamiento en estación depuradora de aguas residuales urbanas, y una orgánica que podrá incinerarse, inertizarse o tratarse por oxidación biológica. El primero de los tratamientos requiere, como siempre, que el producto genere emisiones a la atmósfera admisible o tratable, y el tercero, que su biotoxicidad no sea suficientemente elevada para inactivar los microorganismos que deben oxidarlo.

En cuanto a los colorantes, tintas y pigmentos, sus vías de gestión son análogas a las expuestas en el apartado correspondiente a los residuos de este tipo generados por la industria textil.

Los pesticidas y biocidas no son tampoco, en general, valorizables, dado que se trata de productos altamente estables químicamente y, obviamente, en absoluto biodegradable. Además, su incineración es notablemente problemática, dado que, en la casi totalidad de los casos, su toxicidad de debe precisamente a la presencia en sus moléculas de elementos tóxicos *per se*: halógenos, fósforo, metales pesados, etc, cuya incineración da lugar a productos a su vez también tóxicos, algunos de los cuales pueden ser incluso de tratamiento imposible por los sistemas convencionales de depuración de gases de las incineradoras. De intentar acudir, pues, a dicha vía de destrucción, deben estudiarse y resolverse cuidadosamente estos efectos adversos. Esta temática se desarrolla ampliamente en el Capítulo 7 de esta obra, donde se explican ejemplos de valorización de estos tipos de cenizas.

En el caso de residuos de este tipo no incinerables restan, pues, como vías de gestión, algunos tratamientos fisicoquímicos especiales como la oxidación por agua supercrítica y la inertización o el almacenamiento (en recipientes que ofrezcan las debidas garantías) en depósitos de seguridad.

En el año 2005 la Dirección General de Salud y Protección de los Consumidores (Comisión Europea) ha publicado el informe de «alertas alimentarias» en el que se describen las principales causas de estas alertas ese año. Como principales causas destacan los contaminantes naturales como las micotoxinas o los microorganismos potencialmente patógenos; y la contaminación por sustancias elaboradas por el hombre queda en lugares inferiores de importancia siendo las notificaciones de alerta más frecuentes las causadas por migración de sustancias desde los envases (5%) y las alertas por residuos fitosanitarios (1% de las alertas notificadas).

7.7. RESIDUOS DE LA FORMULACIÓN, FABRICACIÓN, DISTRIBUCIÓN Y UTILIZACIÓN (FEDU) DE REVESTIMIENTOS (PINTURAS, BARNICES Y ESMALTES VÍTREOS), PEGAMENTOS, SELLANTES Y TINTAS DE IMPRESIÓN (CÓDIGO 08)

La variedad fisicoquímica en que se presentan los residuos encuadrados en este apartado aconseja dividirlos en los siguientes subgrupos (no coincidentes, en este caso, con los que establece el catálogo CER):

- Residuos que contienen disolventes orgánicos.
- Residuos de base acuosa.
- Residuos en forma sólida.

El primero de dichos subgrupos está constituido por mezclas, en distintas proporciones, de pigmentos, tintas, colas, resinas y sellantes con disolventes orgánicos, halogenados o no. Si dichos residuos se presentan en forma líquida, son, como se ha afirmado al tratar de los disolventes, fácilmente valorizables mediante recuperación de éste por destilación o, si es clorado, por clorolisis (y, en todos los casos, es valorizable energéticamente por incineración, con las matizaciones que ya se han hecho al respecto en apartados anteriores). En cambio, si están en forma pastosa,

o bien si ésta es la propia cola residual del proceso de destilación, la única solución aplicable es la inertización por solidificación. Lo mismo sucede, obviamente, en el caso de los residuos en forma sólida.

En cuanto a los de base acuosa, dado que en este caso no existe interés económico en la recuperación del disolvente, la única vía posible de valorización la constituye el caso, desde luego bastante raro, de la recuperación de pigmentos por ultrafiltración de los baños de electroforesis. Ello es debido a que, también en este caso, los componentes ligantes de los revestimientos de base acuosa son generalmente resinas polimerizables, que conducen, tras su aplicación, a altos polímeros de difícil o imposible retrogradación.

Excluida la valorización, no cabe más solución que la concentración del residuo en sólidos (eventualmente previa rotura ácida de las emulsiones que lo requieran) mediante evaporación del agua o cualquiera de los métodos existentes de separación mecánica sólido-líquido.

Debido a la aplicación de la Directiva Europea «Council Directive 1999/13/EC» que define como Componente Orgánico Volátil (COV) a casi todos los componentes orgánicos de las formulaciones de pinturas actuales, muchos formuladores han optado por convertir la mayor parte de las pinturas para repintado, basadas en disolventes orgánicos, en sistemas de base agua.

En otro campo de aplicación de las pinturas, para evitar la incrustación de animales y algas en el casco de los buques y embarcaciones se emplean productos que contienen biocidas; sin embargo, debido a la preocupación existente para la protección del medioambiente, actualmente se han desarrollado pinturas anti-iuncrustantes sin biocidas, basadas principalmente en compuestos silicónicos. Este tipo de pinturas coexisten actualmente en el mercado con las que llevan ingredientes biocidas y cada día gana más cuota de mercado pese al coste inicial más caro.

7.7.1. Lodos de pintura de automoción

Las actividades industriales relacionadas con la aplicación de pinturas, en especial en el sector de la automoción dado su gran tamaño, genera un residuo característico denominado lodo de pintura. De hecho hay que hablar de dos tipos de residuos: los sobrenadantes y los lodos de pintura propiamente dichos. Los sobrenadantes están constituidos por una base acuosa que contiene disolventes en diversas concentraciones y, los lodos están formados por una parte no volátil de la pintura (resinas, pigmentos, cargas, aceites secantes, agentes desnaturalizantes, etc.).

La mezcla de disolventes está compuesta principalmente por tolueno (cerca del 40%), xileno (20%), acetato de butilo (12%), metil isobutil cetona (10%), etil benceno y aromáticos. Sometiendo el sobrenadante a un proceso de desorción es posible recuperar los disolventes y volver a usarlos.

El otro residuo, los lodos, tienen una parte orgánica constituida por resinas de naturaleza éster/uretano y elementos de naturaleza inorgánica como compuestos de Si y Ti, además hay presencia de otros metales Mg, Al, Ca, Cr y Zn. El lodo, parcialmente deshidratado, como debe salir del secador una vez han destilado los volátiles, se puede valorizar cerámicamente.

7.7.2. Compuestos Orgánicos Volátiles (COV's)

En este apartado es obligado destinar unas líneas a los COV's, dada la gran importancia de su empleo tanto a escala doméstica como industrial así como posible afección a las personas y al medio ambiente.

Se definen como COV's a todas aquellas sustancia orgánicas, de naturaleza antropogénica, distintas del metano, que son capaces de producir oxidantes fotoquímicos por reacciones con óxidos de nitrógeno en presencia de luz solar. La Directiva 1999/13/CE, de 11 de marzo de 1999, relativa a las emisiones de COV's debidas al uso de disolventes orgánicos en determinadas actividades e instalaciones, completa la anterior definición y añade que todo producto orgánico con una presión de vapor superior a 0,01 kPa, en condiciones de presión y temperatura normales (20 ℃ y 101 kPa) sea considerado un compuesto orgánico volátil.

Como compuestos químicos, los COV's, se podrían diferenciar entre COV's oxigenados (alcoholes, cetonas, ésteres), COV's hidrocarburos (alifáticos y aromáticos) y COV's halogenados. Desde el punto de vista de la clasificación, los COV's se pueden diferenciar, atendiendo respectivamente a su presión de vapor (mmHg) y punto de ebullición (℃) por:

- Volátiles (>0,13 mmHg y <100 ℃), se hallan predominantemente en fase gaseosa.
- Semivolátiles (de 0,1 a 10^{-7} mmHg y de 100 a 325 ℃) se distribuyen entre fases atmosféricas gaseosas y material adherido a partículas en suspensión.

- No volátiles ($< 10^{-7}$ mmHg y > 325 ℃) se presentan adsorbidos en las partículas atmosféricas.

Por su aplicabilidad se pueden clasificar en:

- Combustibles.
- Disolventes.
- Desengrasantes.
- Conservantes.
- Agentes de limpieza.
- Dispersantes.
- Propelentes.
- Reactivos.
- Ignífugos, etc.

Tampoco hay que olvidar que se producen emisiones masivas de COV's de origen geológico en las erupciones volcánicas (por ejemplo, se ha comprobado que las emisiones volcánicas de clorometano supera en diez veces las de origen antropogénico). Sin embargo, a nivel planetario se calcula que hoy en día las emisiones antrópicas alcanzan un 80% del total, de ahí la importancia de establecer metodologías y controles sobre las emisiones.

En el caso de los NOx, las fuentes principales de emisión son el transporte, las centrales térmicas, las refinerías de petróleo, los incendios y gran número de procesos químicos. Los compuestos clorofluorocarbonados (CFC's) son los principales causantes de la destrucción de la capa de ozono estratosférico. Se calcula que un átomo de cloro puede llegar a destruir hasta 100.000 moléculas de ozono. A pesar que la molécula de CFC es bastante más densa que el aire, las corrientes atmosféricas los impulsan a capas superiores hasta alcanzar el ozono estratosférico.

Todos los disolventes orgánicos son tóxicos, aunque su acción varía de unos a otros. Los vapores que desprenden son más pesados que el aire, por lo que su mayor concentración se hallará cerca del suelo. La inhalación más o menos prolongada da lugar a diversos cuadros clínicos. Así está reconocida la lesión hepatorrenal debida al tolueno, tricloroetileno, cloroformo y tetracloruro de carbono, así como la depresión de médula ósea y anemia aplásica asociada a la inhalación del benceno contenido en colas y pegamentos. La gasolina puede ser teratogénica y varios disolventes son carcinogénicos en animales, si bien no se ha demostrado que lo sean en humanos.

Por todo ello muchos trabajadores industriales están expuestos a disolventes y vapores tóxicos y se han establecido valores umbrales límite (TLV) y concentraciones máximas autorizadas (CMA) para la prevención de riesgos y ha entrado en vigor el Real Decreto 117/2003, de 31 de enero, relativo a la emisión y regulación de emisiones de COV's en determinadas actividades.

La USEPA acaba de establecer recientemente nuevos reglamentos para evitar, o minimizar, la emisión de productos contaminantes procedentes de tintorerías de lavado en seco, en especial al percloroetileno. Este es uno de los 187 productos contaminantes que la USEPA sitúa en la categoría de tóxicos al aire, susceptibles de provocar graves problemas de salud.

7.7.3. Pinturas y emisiones de COV

En los recubrimientos superficiales que abarcan las aplicaciones de pinturas, lacas, barnices o imprimaciones con propósitos decorativos o de decoración, se emiten COV puesto que, con frecuencia, la porción volátil de los recubrimientos superficiales se acerca al 50% y la mayoría se volatiliza. Agencias de protección del consumidor europeas y americanas han demostrado la emisión de COV en pinturas de base agua. El mecanismo de formación de la película de pintura, dispersión en agua con un contenido en sólidos entre el 20 y el 60%, sobre una superficie, puede sintetizarse en las siguientes fases:

- Concentración y ordenamiento de las partículas de sólido con la evaporación del agua (el espacio que ocupaba el agua es donde se concentran los sólidos). Se trata de una primera, y la más significativa; de las contracciones.
- Deformación de las partículas. Para ello es preciso un cierto nivel térmico. Las partículas «se sueldan», fase que se denomina de sinterización.
- En la siguiente etapa tiene lugar el fenómeno de la coalescencia (propiedad de ciertas sustancias de unirse o fundirse) a base de la rotura de las membranas intersticiales de las partículas.
- Finalmente tiene lugar la difusión del polímero y se forma una película mecánicamente estable.

Durante el secado, curado, de la película de pintura, los disolventes presentes se evaporan, siendo la causa principal de contaminación. Para eliminar esta emisión, los disolventes deben ser sustituidos o complementados por plastificantes, que se caracterizan por tener un punto de ebullición por encima de 250 ℃ (butil-glicol, etilenglicol-fenil-éter, etc.). Este dato es importante ya que acuerdo con la Directiva 1999/13, que entra en vigor el 1 de enero de 2007, la reducción de COV se tiene que realizar con los com-

puestos presentes en las pinturas con puntos de ebullición inferiores a 250 ℃.

Debido a los altos puntos de ebullición, los plastificantes se han considerado como un posible sustituto para los disolventes en la formulación de pinturas base agua. No obstante se sabe que los plastificantes también contribuyen a la emisión de COV. Las dispersiones poliméricas blandas para uso en pinturas libres de emisión pueden basarse en polímeros como estireno-acrílicos, acrílicos puros o acetato de viniloetileno polímeros tipo VAE.

La mejor forma de evitar el deterioro de la calidad del aire consiste en la preparación de pinturas sin ningún disolvente o agente coalescente. Este tipo de pinturas es conocido como libres de emisión o de muy bajo contenido de COV.

De acuerdo con los estudios de mercado, el 45% de las pinturas producidas en Europa son pinturas decorativas para interiores. El parámetro más crítico de estas pinturas es la resistencia al frote húmedo, propiedad también denominada de lavabilidad. Este tipo de pinturas suele contener entre un 8 y un 18% de ligantes. Sin embargo, existen, además de las domésticas, infinitas aplicaciones industriales que es interesante citar con sus correspondientes particularidades:

7.7.3.1. Pinturas para el sector de automoción

Donde el proceso de aplicación habitual es:

- Enjuagado del disolvente.
- Tratamiento fosfatante. Seguidamente se procede a una etapa de fijación en un horno (de hecho son estufas de curado o de sinterización).
- Pintado y curado. La operación puede repetirse más de una vez.

Por lo general la emisión de COV es muy elevada y, sobre todo, los hornos en circuito abierto, sin puertas, propician una entrada incontrolada de aire que al mezclarse con los disolventes genera una gran polución atmosférica si no se aplican medidas correctoras. La primera acción, tanto de ahorro energético como de protección ambiental, sería la modificación en el diseño de los hornos.

7.7.3.2. Pinturas para bobinas

El recubrimiento superficial de bobinas es un proceso en línea en el que se aplican recubrimientos de contenido orgánico a efectos de protección o decoración, a láminas metálicas empaquetadas en rollos o en bobinas.

7.7.3.3. Pinturas para cables

También se trata de un proceso continuo que consiste en el recubrimiento (barniz o esmalte) eléctricamente aislante sobre conductores de aluminio y cobre, usados en la fabricación de maquinaria eléctrica.

7.7.3.4. Pinturas para envases

Se emplean recubrimientos litográficos de decoración y un barniz de protección.

7.7.3.5. Pinturas para muebles metálicos

Este tipo de recubrimiento pasa por diversas etapas: limpieza de la superficie, aplicación del recubrimiento y curado en hornos de cocido. Las técnicas de aplicación comunes son el rociado y la pulverización. Las cabinas de rociado constituyen el principal foco emisor. Se recomienda mejorar la tecnología de transferencia del recubrimiento.

7.7.3.6. Pinturas para otros recubrimientos

Con ligeras variantes las recomendaciones para mitigar la contaminación son las mismas. Los sectores implicados son numerosos:

- En el caso de la madera para interiores, las pinturas suelen aplicarse por rodillo.
- Papel, que a veces se recubre superficialmente, a efectos decorativos o funcionales. No se debe confundir esta técnica con la impresión sobre papel.
- Textiles, algunos recubrimientos proporcionan propiedades como resistencia mecánica, estabilidad, resistencia a ácidos, repelencia al agua, etc.
- Artes gráficas, donde se incluyen procesos diversos como: litografía, prensa periódica, rotograbado y flexografía.

Las técnicas de corrección de las emisiones de COV más empleadas son:

- Absorción: lavado de gases residuales. De aplicación general para caudales con alta concentración (por lo general superiores a 5 g/m^3).
- Adsorción en filtros de carbón activo, para gases con menores concentraciones. Es muy efectiva.

- Condensación, únicamente para flujos de alta concentración de COV. Oxidación (por lo general mal denominada incineración), ya sea una oxidación térmica o catalítica.

La recomendación más sobresaliente es la elaboración y uso de pinturas libres de emisión y el cambio o modificación de los hornos de curado. Sobre todo con esta última propuesta se podrían evitar los sistemas de corrección tradicionales ya citados, aparte de lograr un ahorro energético importantisimo.

7.8. RESIDUOS DE LA INDUSTRIA FOTOGRÁFICA (CÓDIGO 09)

Los residuos de la industria fotográfica, entendida la fotografía en sentido amplio, es decir, incluyendo en ella a las basadas en cualquier gama del espectro electromagnético: fotografía en VIS, IR y UV, radiografía, gammagrafía, etc., pueden dividirse en dos grandes subgrupos:

- Emulsiones y placas fotográficas impregnadas con ellas.
- Productos de revelado, fijación, lavado, etc.

Las primeras contienen sales metálicas sensibles a la radiación electromagnética o metales finamente divididos (en el caso de la fotografía en blanco y negro, exclusivamente de plata; en el de la fotografía en colores, también de otros metales). Así pues, dichos metales pueden recuperarse disolviéndolos en un baño ácido y sometiendo después las soluciones salinas obtenidas a deposición catódica, o bien empleando como ácidos disolventes los mismos hidrácidos de los que derivan las sales fotográficas, con lo cual se obtienen directamente dichas sales, reutilizables así para su objeto primitivo.

Los segundos son productos orgánicos, generalmente del grupo de los fenoles, por lo que se remite el lector al apartado correspondiente a los residuos de la industria química orgánica.

De los residuos de este grupo, los que contienen plata constituyen un buen ejemplo de valorización. Los diferentes sistemas que permiten la valorización de la plata son:

- Intercambio iónico.
- Reducción de Ag^+ a Ag mediante reacción química (con borohidruro sódico).
- Recuperación de la plata mediante electrodiálisis.
- Método electroquímico.

7.9. RESIDUOS INORGÁNICOS DE PROCESOS TÉRMICOS (CÓDIGO 10)

Además de los residuos de las industrias de proceso térmico más comunes (centrales térmicas, fundiciones, etc.), hay que encuadrar en este grupo a los de las industrias que se podrían denominar «de los silicatos», por ser éstos el denominador común de sus productos: las del cemento, cerámica y vidrio.

Así, globalmente considerados, dichos residuos pueden clasificarse en:

- Escorias y asimilables de base silícea.
- Escorias, fundentes y asimilables de base salina no silícea.
- Cenizas volantes, sedimentables o procedentes de sistemas de depuración de emisiones gaseosas.
- Residuos de arenas de fundición.
- Residuos metálicos (polvo, granalla, retales, piezas, etc.).

Con la excepción de las cenizas volantes de las incineradoras de RSU, residuo especial para el que sólo existe, por el momento, una vía de valorización a partir de la vitrificación pero con un importante componente económico, y de los fundentes y escorias de base salina (residuos estos también especiales, de los que a duras penas se pueden recuperar las partículas metálicas que contienen), los residuos de este grupo ofrecen buenas posibilidades de valorización.

De un lado, las generalmente excelentes características mecánicas de los residuos minerales (arenas, escorias silíceas), junto con la inercia química que deriva de su composición, las hacen atractivas como material de relleno y construcción (capas granulares en explanación de carreteras, material filtrante en trasdosados de obras de fábrica y construcción de dispositivos drenantes, etc.); y, de otro, los residuos metálicos pueden valorizarse fácilmente sin o con tratamiento previo, reintroduciéndolos en el horno de fusión o reducción. De la importancia de esta vía de valorización da idea el hecho de que en regiones industriales enteras (como es el caso de Cataluña), toda la industria termometalúrgica del hierro y del aluminio existente en ellas emplee como únicas materias primas de partida residuos de ambos metales.

También debe dejarse constancia de que la utilización como relleno no es la única vía de valori-

zación posible para los residuos minerales de este grupo. De hecho, gran parte de ellos pueden emplearse, y de hecho se emplean, como aditivos y cargas para cerámicas y cementos. Como ejemplo, es práctica común incorporar a las formulaciones de las pastas de moldeo de cerámica proporciones significativas (en torno al 10%) de polvo cerámico ya cocido («*groc*») procedente de la molienda de desechos o productos no conformes de la propia factoría. Es también práctica común incorporar al crudo de cemento o al clínquer escorias de termometalurgia férrica. De todo ello hay innumerables ejemplos en los Capítulos 5 y 6 de esta obra.

En cuanto a los residuos aludidos al principio, las cenizas volantes son, como se ha dicho, residuos especiales cuya composición química (sales, óxidos y metales pesados libres) les confiere, de una parte, una incidencia ambiental negativa potencial considerable y, de otra, les cierra prácticamente todas las vías de valorización convencionales. Lo corriente para ellas, por el momento, es el vertido en instalaciones para residuos especiales, la inertización por cementación seguida de vertido en instalaciones para no especiales o la vitrificación, que permite conseguir un producto perfectamente inerte, homologable a las escorias silíceas antes citadas en cuanto a características mecánicas y posibilidades de aplicación.

Desde hace mucho tiempo estos residuos han sido profusamente empleados. Centrando el problema en los tipos de industria citados, y de forma resumida, las principales vías de valorización son las siguientes:

- Construcción de bases y subbases con escorias de horno eléctrico.
- Uso de escorias, arenas de fundición y cenizas volantes en la fabricación del cemento y en procesos cerámicos.
- Recuperación del Zn y Pb de los polvos de acería.
- Incorporación de ceniza volante al cemento y a la formulación de hormigones.
- Uso de cenizas volantes en los procesos de solidificación/estabilización de materiales en general y residuos en particular.

Otros muchos residuos de este tipo de industrias, metalúrgicas en general, pueden ser valorizados en las propias fundiciones.

7.10. RESIDUOS INORGÁNICOS QUE CONTIENEN METALES PROCEDENTES DEL TRATAMIENTO Y REVESTIMIENTO DE METALES Y DE LA HIDROMETALURGIA NO FÉRREA (CÓDIGO 11)

Los residuos que generan este tipo de industria son líquidos (baños), lodos y residuos sólidos del tratamiento y revestimiento de metales (galvanizado, fosfatado y decapado).

En el caso de los residuos líquidos lo primero que debe valorarse son las técnicas de minimización para reducir al mínimo la cantidad de residuo. En este sentido algunas de las posibilidades de valorización son:

- Concentración de sales metálicas presentes en las aguas de enjuague para su reciclaje como baño de tratamiento de superficie. (Se puede emplear el intercambio iónico, la ósmosis inversa, o la evaporación).
- Regeneración de baños clorhídricos por tratamiento térmico.

Las actuaciones de minimización se basan, primordialmente, en ajustes de proceso que optimicen el aprovechamiento de los baños de tratamiento (prevención y reutilización de arrastres líquidos, etc.); y las de valorización, en recuperar y reutilizar los componentes de dichos baños (ácidos, sales metálicas, etc.), o bien en regenerar los baños.

La regeneración de los baños electrolíticos puede consistir simplemente en su concentración por evaporación parcial del disolvente (agua) o comportar el empleo de técnicas más sofisticadas como ósmosis inversa, electrodiálisis, intercambio iónico, etc.

La recuperación de los componentes ácidos de los baños puede realizarse por destilación (limitada a ácidos volátiles pero estables, es decir, prácticamente al caso del HCl) o por electrodiálisis; y la de los iones metálicos, por precipitación y redisolución.

Como en todos los casos estudiados anteriormente, cuando no es posible la valorización hay que acudir a tratamientos fisicoquímicos de detoxificación. Dadas las características químicas de estos residuos, los más empleados son la neutralización, la precipitación y la inertización por solidificación.

Los dos casos particulares de este grupo que justifican mención específica son los de los residuos crómicos y cianurados. De los segundos se ha tratado ya en apartados anteriores; en cuanto a

los crómicos, hay que citar la vía de recuperación del sulfato crómico de los baños que lo contienen mediante precipitación como óxido por la acción del óxido magnésico y posterior redisolución de éste con ácido sulfúrico (nótese que este proceso constituye lo que se podría denominar una «concentración por vía química», dado que su resultado neto es un baño de la misma composición química pero cuya concentración puede fijarse en el grado que se desee):

$$Cr_2(SO_4)_3\,(dil.) + 3\,MgO \rightarrow 3\,MgSO_4\,(dil) + Cr_2O_3$$

$$3\,H_2SO_4\,(conc.) + Cr_2O_3 \rightarrow Cr_2(SO_4)_3\,(conc.) + 3\,H_2O$$

También es posible la recuperación del Cr_2O_3 por tratamiento térmico en incineradora de los fangos residuales que lo contienen.

En el caso de los fangos para que la recuperación del metal sea rentable es preciso que el metal en cuestión tenga un precio elevado, como acontece con el Ni o el Cr. En el caso de los residuos que contienen cromo, las posibilidades de valorización son diversas:

- Recuperación del Cr de los baños de sulfato de cromo mediante la precipitación del óxido de cromo.
- Reciclado de sales de cromo mediante electrodiálisis.
- Recuperación del óxido de cromo a partir de las cenizas de los procesos térmicos de fangos u otros residuos ricos en Cr.

En los casos en que la valorización no sea posible, o rentable, se debe asegurar la reducción del Cr^{+6} soluble y muy tóxico a Cr^{+3} insoluble y menos tóxico.

Debido al carácter tóxico de los residuos cianurados, el proceso obligado es la decianuración (oxidación de los cianuros para obtener CO_2 y N_2), o inertización para su posterior vertido.

7.11. RESIDUOS DEL MOLDEADO Y TRATAMIENTO DE SUPERFICIE DE METALES Y PLÁSTICOS (CÓDIGO 12)

Comprende este grupo, por un lado, los residuos propios de los materiales citados que se generan en el curso de las operaciones citadas (moldeo, mecanizado, forja, estampación, temple, corte, limado, etc.) y, de otra, los de los eventuales productos auxiliares empleados en dichas operaciones: aceites de corte, taladrinas, sales de temple, lodos de pulido y esmerilado, etc. Obviamente, los tratamientos de superficie a que se refiere este apartado no comprenden los que implican recubrimiento por otros metales o sus compuestos, de los que se ha tratado en el apartado anterior.

Los residuos del primer subgrupo citado comprenden las piezas no conformes, retales, limaduras, polvo, granalla, granza, etc., de los metales o plásticos de que se trate. Siendo, pues, de su misma naturaleza fisicoquímica, son inmediata y fácilmente reciclables. Además, es obvio que existe la posibilidad de valorizar energéticamente los fragmentos de plástico si no es posible o conveniente su recuperación material.

En cuanto al otro subgrupo, existe generalmente la posibilidad (que debe ser, como ya se ha dicho al tratar sobre otros tipos de residuos combustibles, estudiada cuidadosamente caso por caso) de valorizar energéticamente los que sean susceptibles de ello (básicamente, aquellos que contengan hidrocarburos); si no es posible, cabe siempre acudir al recurso de la inertización por solidificación.

Dentro de este grupo, el tipo de residuos que merece destacarse (en este caso por la variedad de tratamientos que le son aplicables) son las taladrinas, fluidos de mecanizado usados para refrigerar y lubricar la zona de contacto entre la herramienta de mecanizado y la pieza en gran mayoría de las máquinas de mecanizado, constituidas por emulsiones disolvente orgánico/agua de bajas concentraciones en los primeros (<5%). En efecto, a dichos productos les son aplicables, entre otros los siguientes tratamientos o secuencias de ellos:

- Rotura ácida de la emulsión seguida de decantación de las fases acuosa y orgánica y de neutralización de la primera e incineración de la segunda.
- Incineración previa mezcla en bajas proporciones con residuos líquidos de alto poder calorífico.
- Inertización por solidificación.
- Evaporación de la fase acuosa con recuperación de la orgánica, seguida o no de incineración de ésta (que puede, a su vez, eventualmente, proporcionar el calor necesario para la evaporación de la fase acuosa).

También cabe señalar, a este respecto y como ejemplo de minimización de residuos mediante modificación del proceso, que últimamente se están desarrollando técnicas y maquinaria para el mecaniza-

do a alta velocidad, en el que el tiempo de contacto herramienta-pieza (y con él el calentamiento de ambas) se reducen hasta el punto de permitir reducir o prescindir totalmente del fluido de corte.

7.12. RESIDUOS DE ACEITE (EXCEPTO ACEITES COMESTIBLES Y LOS APARTADOS 05 Y 12) (CÓDIGO 13)

A los efectos de este grupo, se entiende por aceites minerales a los hidrocarburos ~~ea~~si exclusivamente alifáticos ~~de~~ alto peso molecular, con propiedades lubricantes, que pueden contener o no aditivos estabilizantes, viscoestáticos, etc. Se excluyen de esta definición los denominados «piralenos» o «aceites de transformador eléctrico», hidrocarburos aromáticos bifenílicos o terfenílicos policlorados (abreviadamente PCB's o PCT's), cuya estabilidad química y altos contenidos en cloro los convierten respectivamente en altamente persistentes en el medio ambiente y en precursores claros, por incineración, de las policloro-dibenzo-dioxinas y los policloro-dibenzo-furanos (abreviadamente dioxinas y furanos, cuya toxicidad es de dominio público).

La consecuencia inmediata de esta exclusión es que es altamente desaconsejable la mezcla de unos y otros, dado que la extrema dificultad de separarlos posteriormente destruye en la práctica la posibilidad de regenerar los aceites lubricantes que contengan proporciones significativas de PCB's y PCT's. Así, una mezcla de aceites lubricantes con PCB's o PCT's deberá gestionarse como un PCB/PCT residual, es decir, bien por incineración en instalaciones dotadas de sistemas de depuración capaces de reducir las emisiones de gases ácidos y de dioxinas y furanos a valores inferiores a los límites establecidos, o bien por decloración catalítica, que permite retrogradarlos a hidrocarburos no sustituidos.

Los aceites usados de automoción permiten valorización a dos niveles bien diferenciados. En primer lugar la regeneración del aceite usado que consiste en una destilación fraccionada del aceite mineral. Los contaminantes se concentran en los fangos y el asfalto resultante. Se consigue recuperar un 60% del material entrante que se convierte en base para la incorporación de nuevos aditivos. La valorización energética se basa en la incineración o en la combustión en un motor de cogeneración, previo lavado del aceite.

Otro grupo de aceites lo constituyen aquellos que contienen PCB's (policlorobifenilos) o PCT's (policlorotrifenilos). Se catalogan así los aceites que contienen más de 50 ppm de PCB /PCT. Los PCB's, de los que existen más de 200 compuestos diferentes, se utilizaban por sus excelentes propiedades dieléctricas en transformadores eléctricos. También se usan en la fabricación de pesticidas, pinturas, tintas, colas, etc. Son compuestos muy estables, no biodegradables, bioacumulativos y de carácter carcinogénico, de ahí la prohibición del tratamiento de valorización convencional, antes expuesto, de los aceites normales cuando Se hallan aditivados con PCB /PCT. Este tipo de residuos deben ser destruidos por una empresa especializada.

Restan pues, como integrantes de este grupo, las emulsiones agua/aceite (entre las que hay que incluir a los llamados residuos aceitosos de navegación o *marpol*) y los lubricantes usados. Las vías de gestión aplicables a las primeras son, dadas sus características fisicoquímicas, prácticamente las mismas que las expuestas en el apartado anterior para las taladrinas. A ellas se deberían, sin embargo, añadir la separación de las dos fases de la emulsión (acuosa y orgánica) por centrifugación, previa o no la desestabilización o rotura de dicha emulsión.

En cuanto a los lubricantes usados, constituyen por un lado un problema de importancia no desdeñable (baste considerar el hecho de que un solo litro de aceite usado es capaz de formar, si se vierte a un curso de agua, una película sobre ella de una hectárea de superficie, dificultando gravemente su oxigenación y consiguiente autodepuración), y por otro un excelente ejemplo de posibilidad de valorización a gran escala y con obtención de un producto que sustituye, y además con cierta ventaja, al virgen correspondiente.

Al margen de los comentados vale la pena dedicar unos apartados a ciertos residuos que de una manera u otra tienen que ver con esta tipología.

7.12.1. Los alpechines

España, junto a Italia y Grecia, es un gran productor de aceite de oliva y, en consecuencia también de un residuo específico denominado alpechín, que es el fruto de la prensada de la aceituna en las almazaras (plantas de producción de aceite). Solo en España se generan mas de 10 millones de m^3/año de esta agua residual que, para complicar más, se produce estacionalmente (de noviembre a febrero).

El alpechín es un líquido negruzco y olor fétido que suele contener en suspensión restos de pulpa de

aceituna, mucílagos, trozos de huesos e incluso pequeñas cantidades de aceite (hasta un 0,5% emulsionado de forma estable). El bloque principal de contaminantes lo constituyen sustancias orgánicas, formada por azúcares, sustancias nitrogenadas, ácidos, polialcoholes, taninos, grasas, compuestos fenólicos, etc.

Su tratamiento en EDAR's está prohibido debido principalmente a los productos polifenólicos, ácido cafeico, etc., de gran poder bactericida, lo que inhibe las reacciones en las depuradoras convencionales, al margen del problema de la estacionalidad. El alpechín se encuentra entre los afluentes más contaminantes debido a su elevada DQO y DBO, lo que hace preciso un tratamiento previo antes de su vertido a cauce publico.

Debido a la enorme cantidad generada, se han ensayado multitud de sistemas de tratamiento desde su empleo como fertilizante hasta su tratamiento anaerobio y aerobio. La Tabla 4.14 muestra un análisis típico de un alpechín.

Entre las posibles alternativas disponibles de cara al tratamiento del alpechín destaca el tratamiento biológico aerobio por fangos activados. Este tratamiento consigue una reducción de la DQO desde el 15 al 40%. Obviamente después se deberán tratar los fangos resultantes del sistema pero ello es relativamente fácil si se aplican sistemas de deshidratación y después modelos de conversión energética sostenibles.

Más recientemente, sobre todo a partir de 1995, se ha impuesto el sistema de centrifugación de dos fases. En el denominado sistema de tres fases (por cada 1.000 kg de oliva se obtienen 550 kg de orujo, 1,3 m^3 de alpechín y 210 kg de aceite de oliva) se centrifuga la masa batida obteniéndose tres fracciones:

- Una fase sólida (orujo).
- Dos fases líquidas: el aceite y el alpechín.

Tabla 4.14. Características físico/químicas del alpechín (g/l)

Parámetro	Valor (g/l)
pH	4,8
DBO_5	52,0
DQO	95,0
Nitrógeno Kjeldahl	0,39
Polifenoles totales	0,0023
Fósforo	1,90
Sólidos totales	130,3
Sólidos disueltos totales	63,25
Sólidos disueltos minerales	21,2
Sólidos en suspensión totales	67,1

En la modalidad de dos fases (Por cada 1.000 kg de oliva se obtiene 800 kg de alperujo y 200 kg de aceite de oliva), éstas son:

- Aceite.
- Alperujo.

El alperujo es un residuo semisólido, de olor característica y textura pastosa, cuya composición media se expone en la Tabla 4.15.

Tabla 4.15. Caracterización química del alperujo

Parámetro	Intervalo (%)
Humedad	58-69
Materia orgánica	92-96
pH	5,0-5,5
CE (dS/m)	3,9-5,8
N	1,0-1,3
P_2O_5	0,7-3,2
K_2O	2,0-3,5
Grasas	16-31
Carbohidratos	3,2-16,4

El problema final vuelve a ser el secado para proceder a su conversión energética pero, en cualquier caso el problema es mucho más asequible, desde el punto de vista del tratamiento, que el residuo líquido del alpechín.

7.12.2. Los jabones

El jabón es el tensoactivo probablemente más usado en el mundo. Además de ser el principal ingrediente de las pastillas utilizadas para el aseo personal, también encuentra aplicación en la formulación de detergentes y numerosos productos industriales de lavandería.

En sus inicios, el jabón provenía de grasas animales y aceites vegetales. En la actualidad se fabrica a partir de ácidos grasos de diferente longitud de cadena. El consumo de jabón en el mundo superó las 9 millones de toneladas en 1996, lo que representa el 30% del consumo mundial de tensoactivos.

Desde el punto de vista químico, los jabones son sales de ácidos grasos de cadena larga (usualmente en el rango C_{12}-C_{18}) formados por saponificación, y probablemente uno de los compuestos químicos más antiguos desarrollados por el hombre. Desde el punto de vista ambiental, los jabones son vertidos después de su uso a las aguas residuales donde terminan en la depuradora urbana. En aguas duras el jabón tiende a

formar sales insolubles de calcio y magnesio. Esta tendencia se reduce cuando se usa un ingrediente con compuestos secuestradores de estos iones como son los fosfatos, boratos policarboxilatos, etc.

El jabón se degrada en condiciones anaerobias y no genera especial impacto en las EDAR's. Cosa diferente acontece con las sales de alcalinotérreos formadas que son altamente insolubles y acaban siendo transferidas a los fangos de las EDAR's. Estas sales pasarán a formar parte de la fracción inorgánica de los fangos. Por lo general, en el caso de fangos digeridos las concentraciones de jabones son de 20 a 30 mg/gMS y de 90 a 100 en el caso de fangos no digeridos.

7.13. RESIDUOS DE SUSTANCIAS ORGÁNICAS UTILIZADAS COMO DISOLVENTES (EXCEPTO LAS APARTADOS 07 Y 08) (CÓDIGO 14)

Los disolventes constituyen un grupo de sustancias orgánicas caracterizado, más que por analogías de composición química, por la propiedad física de disolver o ser miscibles con gran número de otras sustancias orgánicas, sólidas o líquidas.

Dicha propiedad les confiere, a su vez, un gran abanico de aplicaciones en la industria: en efecto, y entre otras aplicaciones, los disolventes se emplean en la industria de pinturas, barnices y tintas, como «vehículo» de éstas; en la petroquímica, farmacéutica, de química fina y de plásticos como *extractantes* o medios de polimerización; y en la mecánica y electrónica como desengrasantes.

Consideradas, pues, estas aplicaciones, es fácil deducir con qué tipos de sustancias estarán contaminados los residuos de disolventes.

En cuanto a la gestión de los disolventes y sus residuos, hay en primer lugar que hacer notar que existe una vía obvia de valorización de los residuos con disolventes procedentes de limpieza y desengrasado: la utilización «en cascada» o «a contracorriente», es decir, el empleo de disolventes ligeramente contaminados para operaciones que no requieran altos grados de pureza (limpieza previa, desbaste, etc.), reservando los de mayor pureza para la o las fases finales de dichas aplicaciones.

Si esta forma de operar no es viable, y el residuo contiene menos del 30% de impurezas, puede acudirse al proceso de regeneración siguiente:

- Almacenamiento y segregación de disolventes halogenados y no halogenados.
- Separación mecánica (por sedimentación, filtración o centrifugación) para eliminar sólidos en suspensión y agua no emulsionada.
- Destilación, que permite separar el agua emulsionada y a los disolventes de distintos puntos de ebullición entre sí.
- Deshidratación final mediante decantación mecánica o adsorción sobre cloruro cálcico o gel de sílice.

Los residuos con contenidos excesivos de impurezas pueden gestionarse por incineración, teniendo siempre en cuenta las cautelas que se han expuesto ya repetidas veces sobre los productos emitidos a la atmósfera.

Finalmente, y aunque no constituya en rigor un método de gestión de residuos de disolventes sino más bien de tratamiento de aguas, hay que citar como una de las formas de separación de éstos de fases acuosas en las que se encuentren en pequeñas proporciones, la adsorción en carbón activo seguida de desorción térmica, que permite recuperar el disolvente.

La Tabla 4.16 muestra ejemplos de disolventes orgánicos y la actividad industrial donde son utilizados.

7.14. RESIDUOS DE LA CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (INCLUYENDO LA CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS) (CÓDIGO 17)

La gestión más adecuada para los residuos de construcción, demolición, pavimentos y obra pública es el relleno de desniveles, terraplenes, etc. Sometidos a trituración y clasificación se pueden usar como áridos. Esta parte, en su vertiente de valorización, se amplia en los Capítulos 8 y 14 de esta obra.

Debe tenerse especial precaución en el tratamiento de las demoliciones que contienen amianto ya que por ser un material cancerígeno debe tratarse de manera particular (en las demoliciones se genera mucho polvo y el amianto es peligroso, precisamente, por inhalación).

7.15. RESIDUOS DE LAS INSTALACIONES PARA EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS, DE LAS PLANTAS EXTERNAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES Y DE LA INDUSTRIA DEL AGUA (CÓDIGO 19)

El capítulo más importante, tanto cualitativa como cuantitativamente, de los residuos de este grupo lo constituyen, por una parte, las escorias y cenizas de

Tabla 4.16. Ejemplos de disolventes y principales aplicaciones industriales

Disolventes	Aplicaciones principales
Acetona	– Industria química. – Industria textil. – Materiales plásticos. – Fotografía. – Imprenta. – Procesos de limpieza.
Butanol	– Industria química. – Productos farmacéuticos. – Industria textil. – Fabricación de revestimientos. – Pinturas y barnices.
Acetato de butilo	– Industria química. – Imprenta. – Fabricación de revestimientos. – Pinturas y barnices.
Ciclohexanona	– Industria química. – Imprenta. – Fabricación de revestimientos. – Materiales plásticos.
Acetato de etilo	– Industria química. – Productos terapéuticos. – Productos pirotécnicos.
Isopropanol	– Industria extractiva. – Aromatización de alimentos. – Cosméticos. – Pinturas y barnices.
Metil-etil-cetona (MEK)	– Industria química. – Adhesivos. – Pinturas y barnices.
Metil-isobutil-cetona (MIBK)	– Industria química. – Adhesivos. – Pinturas y barnices.
Propanol	– Industria textil.
Tolueno	– Limpieza y desengrase de metales. – Vehículos a motor. – Adhesivos. – Industria química. – Pinturas y barnices.
Xileno	– Limpieza y desengrase de metales. – Producción de coque y gas. – Industria química. – Pinturas y barnices. – Vehículos a motor. – Imprenta.
Tricloroetileno	– Industria química. – Industria textil. – Limpieza en seco. – Desengrase. – Fabricación de revestimientos.
Cloruro de metileno	– Industria química. – Productos farmacéuticos. – Productos alimenticios. – Decapantes. – Desengrasantes.

incineración y, por otra, los fangos de depuración de aguas residuales urbanas e industriales y de residuos industriales líquidos.

Se explican con detalle, en los capítulos dedicados al tratamiento de los RSU y de fangos de EDAR por conversión energética, el origen y características de las escorias y cenizas.

Las primeras, residuo no especial, contienen una fracción que es valorizable en cualquier caso, y cuyas vías de valorización se han expuesto en este mismo capítulo: los metales, básicamente férricos, aluminio, cobre y aleaciones de todos ellos. Dicha fracción metálica puede separarse de la mineral mediante cribado, separación magnética (chatarra férrica) o por corrientes de Foucault (chatarra alumínica).

En cuanto a la fracción mineral, si sus contenidos en inquemados y en metales pesados en formas movilizables (iones) y su alcalinidad no superan unos determinados límites, constituye un material cuyas características mecánicas igualan, e incluso superan, a las de los inertes de construcción de los que se ha tratado en el apartado anterior y que, por tanto, puede emplearse para las mismas aplicaciones allí descritas.

Hay que hacer notar que, en muchos casos, la simple exposición al aire de dichas escorias durante periodos de tiempo del orden de un mes es suficiente para que el dióxido de carbono contenido en aquél dé lugar a carbonatos insolubles de los iones metálicos y neutralice la alcalinidad hasta colocar los parámetros correspondientes por debajo de los límites antes citados.

Las cenizas volantes, en cambio, constituyen un residuo especial a causa, básicamente, de sus altos contenidos en cloruros y en metales pesados. De sus posibilidades de valorización, algunas de ellas complejas, se comentan extensamente en los Capítulos 7, 11 y 12 de esta obra.

En la actualidad, en España quedan, pues, para su gestión, únicamente las vías de tratamiento fisicoquímico (inertización por solidificación con cemento por vía húmeda), seguido de deposición en instalaciones para inertes o no especiales o la deposición directa en vertederos de residuos especiales.

En cuanto a los fangos de depuración de aguas residuales, existe al menos una vía de valorización que no ha llegado por ahora a la aplicación comercial pero que puede hacerlo en cualquier momento, dependiendo de circunstancias no técnicas: la incorporación a pastas de fabricación de cerámica estructural (ladrillos, machihembrados, tejas, bovedillas,

etc.). El producto resultante (*Eco-bric*) presenta características mecánicas análogas al virgen, con las ventajas de menor peso y mayor aislamiento térmico.

Las vías de tratamiento pasan todas por la inertización por solidificación, precedida, en los casos en que el balance energético lo aconseje, por desecación total o parcial mediante filtrado y/o evaporación del agua de impregnación, seguida en todos los casos de deposición en instalaciones adecuadas

7.16. RESIDUOS MUNICIPALES Y RESIDUOS ASIMILABLES PROCEDENTES DE LOS COMERCIOS, INDUSTRIAS E INSTITUCIONES, INCLUYENDO LAS FRACCIONES RECOGIDAS SELECTIVAMENTE (CÓDIGO 20)

No sólo la subida de los precios de los carburantes, sino también los problemas ambientales derivados de la utilización de los mismos, su agotamiento a corto plazo y la preocupación por el calentamiento global del planeta, ha provocado la búsqueda de nuevas formas energéticas menos contaminantes, renovables y más baratas, como los biocarburantes. Éstos, incluidos dentro del ámbito de las energías renovables, son fundamentalmente el *bioetanol* (alcohol etílico obtenido a partir de ciertos cereales que se utilizan como aditivo de la gasolina sin plomo, en vez del MTBE derivado de combustibles fósiles), y el *biodiesel* (derivado de aceites vegetales, y sustitutivo del gasóleo en vehículos, calefacciones o maquinaria). De especial interés es el uso de los aceites de fritura, también llamados aceites vegetales usados o aceites domésticos, para la producción del biodiesel.

España es uno de los países de la Unión Europea que generan mayor cantidad de aceite vegetal usado por habitante, la producción estimada de este residuo en España anualmente es de 750.000 toneladas (en 2005).

La utilización de aceites vegetales usados como combustible cumple con cuatro propósitos fundamentales:

- Utilización de un residuo valorizable como recurso.
- Es una solución para minimizar el agotamiento del petróleo.
- Reducción de emisiones de contaminantes a la atmósfera.
- Reducción de dependencia energética.

7.16.1. Problemática ambiental del aceite vegetal usado

Los aceites vegetales usados constituyen una materia prima de gran volumen, en origen residual y altamente contaminante y, a su vez, una fuente de energía que la sociedad sigue desaprovechando, con la consecuente disminución de la eficiencia energética, principio que en nuestros días es indicativo de la poca concienciación ambiental.

Los aceites vegetales usados, a pesar de no ser tóxicos (no obstante, algunos investigadores insisten en la formación de compuestos tóxicos con las sucesivas frituras y usos), en la actualidad son un problema ambiental importante, debido a que su principal destino suele ser los ríos, los mares y el medio ambiente en general, a los que llegan principalmente a través de la red de alcantarillado. En España, dos tercios de ese aceite acaba en la red de alcantarillado, encareciendo y complicando el tratamiento de las aguas residuales, provocando problemas operativos en las redes de saneamiento y bombeos, atentando contra el medio ambiente y poniendo en peligro la salud de las personas.

Los aceites provocan en las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales Urbanas (EDARU), una disminución del rendimiento de depuración, además de un aumento en el consumo de energía en la depuración de las mismas. Se estima que el gasto energético que los aceites provocan en las EDARU es de un 25%.

En el caso de que los aceites no se hayan podido eliminar de las aguas residuales, bien por los bajos rendimientos de las EDARU o bien por la inexistencia de las mismas, estos acaban en los ríos y mares ensuciándolos y contaminándolos gravemente, rompiendo el equilibrio natural del medio ambiente.

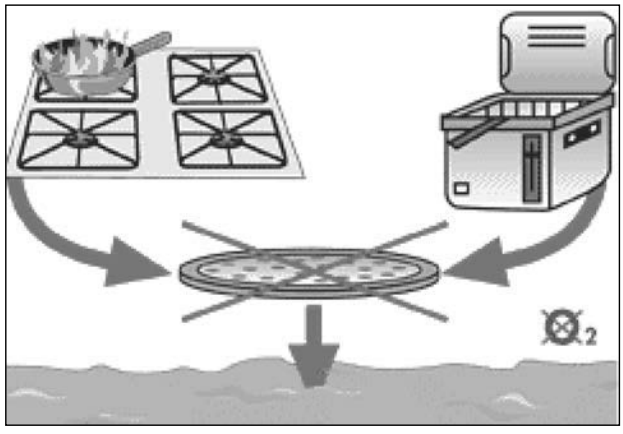


Figura 4.13. Problemática ambiental de los aceites vegetales usados.

Debe tenerse en cuenta que un litro de aceite contamina 1.000 litros de agua, provocando:

- Disminución del paso de luz hacia la fase acuosa.
- Disminución del intercambio de oxígeno con el agua.
- Aumento del crecimiento de microorganismos.

Todos estos problemas, tanto en el medio ambiente natural como en las EDARU, llevan a plantearse la necesidad de la recuperación en el punto de origen y su posterior reciclado, máxime teniendo en cuenta que, además de los beneficios económicos y medioambientales, estas actividades son capaces de generar empleo.

Aunque no exista normativa específica que regule la gestión de los aceites vegetales usados, estos aparecen especificados con el Código L.E.R. contenido en la Orden MAM/304/2002 de 8 de febrero por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la *Lista Europea de Residuos*, y en su corrección de errores. El código correspondiente a *«aceites y grasas comestibles»* es el L.E.R. 20.01.25.

En el artículo 1.1 de la Ley 10/1998, de residuos, se establecen unos objetivos ecológicos que obligan a respetar el principio de jerarquía consistente en prevenir en la medida de lo posible, reutilizar lo que se pueda, reciclar lo que no se pueda reutilizar y valorizar energéticamente todo lo que no se pueda reutilizar ni reciclar, siendo la opción de eliminación la última opción y la menos satisfactoria.

La Directiva 96/61/CE del Consejo de 24 de septiembre de 1996, relativa a la prevención y control integrados de la contaminación, y su transposición al ordenamiento jurídico español, hacen mención a una reducción en origen de las emisiones y vertidos de residuos. Así, el proceso de depuración en la EDARU será más eficiente y los costes de depuración del agua serán inferiores.

La Resolución del 13 de enero de 2000, de la Secretaría General de Medio Ambiente, por la que se dispone la publicación del acuerdo del Consejo de Ministros de 7 de enero de 2000, por la que se aprueba el Plan Nacional de Residuos Urbanos, establece, entre otros, los siguientes objetivos de recuperación y reciclaje: *«Se apoyará y potenciará la recogida selectiva de otros residuos y por su especial relevancia y posibilidades de reciclaje, el Plan prevé la recogida selectiva de aceites y grasas vegetales de origen doméstico e industrial asimilado, mediante la dotación de contenedores específicos, campañas de sensibilización y establecimiento de acuerdos con empresas especializadas en su tratamiento y reciclaje.»*

Dicho plan se propone alcanzar una tasa de recogida y reciclado de los aceites vegetales del 80% antes del 31 de diciembre de 2006.

Según la Ley 10/1998 de Residuos, estos se encuadran entre los de tipo urbano o municipales (artículo 3.b), siendo los productores o generadores de este tipo de residuos los que tienen la obligación de entregárselos a un gestor.

En el artículo 4.3 se establece que *«Las entidades Locales serán competentes para la gestión de los residuos urbanos, en los términos establecidos en esta Ley y en las que, en su caso, dicten las Comunidades Autónomas, corresponde a los municipios como servicio obligatorio, la recogida, el transporte, la eliminación de los residuos urbanos, en la forma en la que establezcan las respectivas Ordenanzas.»*

El artículo 15 estipula que *«los titulares de las actividades en las que se desarrollen operaciones de gestión de residuos no peligrosos distintos a la valorización o eliminación deberán notificarlo al órgano competente en materia medioambiental de las Comunidades Autónomas correspondientes, quedando debidamente registradas estas actividades en la forma que, a tal efecto, establezcan las mismas. No obstante, las Comunidades Autónomas podrán someter a autorización estas actividades»*.

El uso de los aceites vegetales en los piensos comporta riesgos sanitarios, como por ejemplo concentraciones indeseables de materias contaminantes: en especial las PAH, PCB, dioxinas y sustancias asociadas, de ahí que la Directiva 1999/29/CE, relativa a las sustancias y productos indeseables en la alimentación animal, recomiende regular la presencia de aceites de cocina reciclados en las materias primas grasas para piensos. Dicha Directiva ha sido modificada por la Directiva 2001/1020/CE y transpuesta al ordenamiento jurídico español mediante el RD 747/2001, de 29 de junio, por el que se establecen las sustancias y productos indeseables en la alimentación animal.

7.16.2. Logística de recogida del aceite

Los aceites vegetales usados suponen una materia prima barata (coste cero) aunque los elevados costes logísticos asociados a su recogida lo encarecen notablemente, provocando que esta alternativa sólo se haya desarrollado en aquellas zonas en donde las autoridades han fomentado y desarrollado su recogi-

da. En el proceso de producción de biocarburantes, uno de los costes que más influye es el que va asociado a la materia prima, por lo que es de vital importancia las ayudas compensatorias y subvenciones por parte de las administraciones.

En cuanto a la logística de recogida de aceites vegetales usados, sería óptimo establecer una recogida abarcando todos los sectores que lo producen:

- Industrial.
- Hostelería.
- Doméstico.

Ha de tenerse en cuenta que el coste y la eficiencia de la recogida está fuertemente influenciada por el tamaño, tipo y dispersión de la población. La optimización en la logística de recogida resolvería los problemas de contaminación derivados de los vertidos incontrolados de dichos aceites y permitiría una revalorización más eficaz de estos residuos. Para llevar a cabo los sistemas de recogida sería necesaria:

- Buena coordinación entre las Administraciones correspondientes.
- Ayudas y subvenciones por parte de las administraciones.
- Establecer una campaña de información y sensibilización ciudadana sobre la importancia de la recogida de los aceites vegetales usados con el fin de conseguir una mayor colaboración ciudadana. Los medios de difusión serían: prensa, colegios, supermercados, asociaciones vecinales, centros sociales, etc.
- Asegurar la recogida de gran cantidad de aceite vegetal usado: se debe disponer del material y vehículos adecuados, tanto para el almacenamiento como para la recogida de los mismos.
- Asegurar la comodidad de los usuarios: para que los efectos que pueda tener la recogida de los aceites vegetales usados sobre su vida cotidiana sean los mínimos posibles.
- Recipientes adecuados: que permitan la recogida cómoda y fiable. Deberán diseñarse distintos tipos de recipientes en función del sector productor, teniendo en cuenta el volumen de producción de cada uno de ellos.

La Figura 4.14 muestra cómo debería ser la logística de recogida de los aceites usados. Mientras que la Tabla 4.17 propone la estandarización para los envases más adecuados para la logística de recogida.

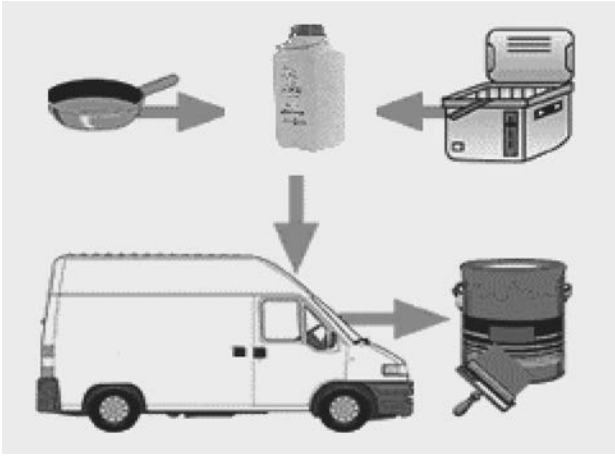


Figura 4.14. Logística de recogida de aceites vegetales usados.

Tabla 4.17. Envases para la recogida de aceites vegetales usados

Productor	Recipiente
Doméstico	Recipiente de 2-10 litros
Hostelero	Recipiente de 50 litros
Comunidades vecinales Supermercados Puntos limpios	

7.16.3.1. *Antes de ser utilizados en los procesos de fritura*

El aceite vegetal se caracteriza por su composición en ácidos grasos; las diferencias entre los diversos tipos de aceites son debidas a la distinta composición de los mismos. Así, atendiendo a su composición los aceites vegetales se pueden clasificar en:

- Aceites ricos en ácidos grasos saturados y ácido oleico (aceite de oliva).
- Aceites ricos en ácidos grasos poliinsaturados (aceite de girasol).

Aproximadamente, el consumo de los aceites vegetales en España es el que se muestra en la Figura 4.15.

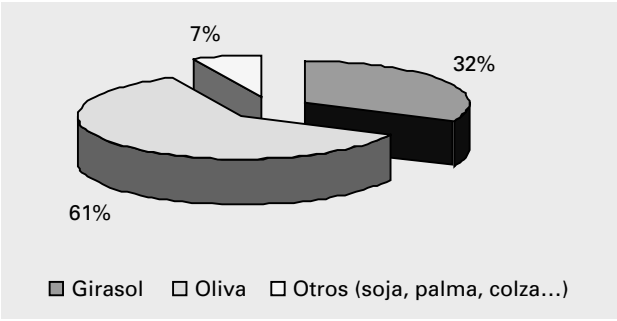


Figura 4.15. Consumo de los aceites vegetales en España.

Dependiendo del tipo de aceite, la composición de los ácidos grasos varía. En las Tablas 4.18 y 4.19 se muestran, respectivamente, la composición de los aceites vegetales y la composición media de los aceites vegetales usados teniendo en cuenta el consumo de aceite.

7.16.3.2. *Caracterización del aceite vegetal usado*

Durante la fritura, el calor es transferido a los alimentos lo que propicia que éstos sufran cambios y reacciones entre sus componentes, evaporándose el agua de las capas superficiales, absorbiéndose aceite, que es el que les imparte el sabor y la textura. Cabe destacar que las reacciones que se producen durante el proceso de fritura son, entre otras, las siguientes:

- *Hidrolíticas.* Los triglicéridos en contacto con humedad o agua se descomponen en diglicéridos y monoglicéridos, liberando una o dos cadenas de ácidos grasos. El resultado de la hidrólisis es la aparición de ácidos grasos libres, que aumentan la acidez del aceite, y en menor cantidad la formación de metilcetonas y lactosas, que pueden producir aromas desagradables.
- *Termooxidativas.* El calentamiento del aceite a las temperaturas utilizadas en la fritura provoca su degradación termooxidativa y la aparición de compuestos que reducen su calidad organoléptica y nutritiva. La velocidad de oxidación no viene determinada solamente por la temperatura, sino también por el tipo y calidad del aceite, por la superficie de exposición al aire, y por la presencia de pro-oxidantes (hierro, cobre), antioxidantes (alfa-tocoferol) y antiespumantes (siliconas). Se forman compuestos polares, polímeros y volátiles.
- *Isomerización.* Los ácidos grasos insaturados contienen dobles enlaces en conformación cis, situados en posiciones muy concretas de la mo-

Tabla 4.18. Composición de aceites vegetales (valores medios en % del total de los principales ácidos grasos)

Ácidos grasos	Oliva	Girasol
Ácido láurico (C12:0)	0	≤ 0,01
Ácido mistírico (C14:0)	≤0,05	≤ 0,01
Ácido palmítico (C16:0)	7-18	5-8
Ácido palmitoleico (C16:1)	0,3-3	≤ 0,2
Ácido esteárico (C18:0)	0,5-5	3-7
Ácido oleico (C18:1)	61-83	15-38
Ácido linoleico (C18:2)	2-18	50-72
Ácido linolénico (C18:3)	≥ 1,5	≤ 0,2
Ácido arcaico (C20:0)	≤ 0,5	≤ 0,6
Ácido gadoleico (C20:1)	0	≤ 0,3
Ácido behénico (C22:0)	0	≤ 1,0
Ácido erúcico (C22:1)	0	0
Ácido lignocérico (C24:0)	0	0

Tabla 4.19. Composición media en ácidos grasos de los aceites vegetales usados en España

Ácido graso	Composición (%)
Ácido mistírico (C14:0)	0,02
Ácido palmítico (C16:0)	10,35
Ácido palmitoleico (C16:1)	0,91
Ácido esteárico (C18:0)	3,35
Ácido oleico (C18:1)	56,35
Ácido linoleico (C18:2)	26,71
Ácido linolénico (C18:3)	1,17
Ácido arcaico (C20:0)	0,5

lécula. Los radicales libres que aparecen durante la termooxidación, provocan la isomerización de los dobles enlaces y su desplazamiento, dando lugar a isómeros trans, isómeros de posición e isómeros conjugados. A medida que aumenta el número de procesos de fritura, aumenta el número de ácidos grasos libres. Además, con el número de frituras en la superficie del aceite aparece una espuma debida a la presencia de los compuestos polares y polímeros, pudiendo llegar a un espesor tal que impida la fritura.

7.16.4. Valorización de los aceites vegetales usados

Las posibilidades tecnológicas del uso de este residuo pasan por su reciclaje y su valorización energética, pues su reutilización para la alimentación animal y humana representaría muchos inconvenientes. Los aceites vegetales usados una vez pretratados pueden ser utilizados como:

- Combustible (aceites sin esterificar o esterificados: biodiesel).
- Aditivo en la industria cerámica.
- Aditivo en la industria química.
- Tratamiento de metales (con ácidos vegetales).

7.16.4.1. Utilización como combustible de los aceites vegetales sin esterificar

Tras haber eliminado las impurezas de los aceites vegetales usados, estos pueden ser utilizados directamente como combustible. El uso de los aceites vegetales como carburante para motores diesel, se remonta al siglo XIX, cuando Diesel inventó el motor de combustión interna alternativo de autoencendido. Posteriormente, a medida que este motor evolucionaba y debido al bajo coste y abundancia de los carburantes derivados del petróleo, se pasó a usar como combustible exclusivamente carburantes derivados del petróleo.

El aceite vegetal puede ser almacenado durante largo tiempo sin deteriorarse, y ser manipulado, transportado y distribuido sin peligro, debido a que no es explosivo, ni inflamable, ni desprende gases tóxicos o cancerígenos. El aceite vegetal únicamente puede ser utilizado en motores diesel porque no es lo suficiente inflamable para poder ser utilizado en motores de gasolina.

Características de los aceites vegetales con respecto al gasóleo

Las principales características de los aceites vegetales con respecto al gasóleo son las que a continuación se mencionan:

- *Intervalo de destilación:* condiciona la facilidad de vaporización del carburante a la salida del inyector. El intervalo de destilación de los aceites vegetales y el del gasóleo es bastante diferente. Algunos aceites vegetales poseen una temperatura de destilación demasiado alta, además de descomponerse antes de alcanzar la temperatura de destilación. Las malas combustiones de los aceites conducen a medio plazo a la aparición de depósitos carbonosos y a la formación de humos negros en el escape.
- *Poder calorífico:* se denomina poder calorífico de una sustancia a la energía liberada cuando una unidad de masa de la misma es completamente oxidada y la temperatura de productos y reactivos es la misma. Los valores típicos de los poderes caloríficos para la mayoría de los aceites vegetales son de alrededor de 9.000 kcal/kg, mientras que los del gasóleo son aproximadamente de 10.300 kcal/kg (un 15% superior).
- *Índice de cetano (autoinflamabilidad):* el número de cetano (NC), valora la aptitud de un carburante para autoinflamarse. Tiene repercusiones directas en el arranque en frío y en la presión máxima que se alcanza en la cámara de combustión. El NC está relacionado con el tiempo transcurrido entre el comienzo de la inyección y el momento en que se da un aumento significativo de la presión en la cámara, lo que indica que la combustión se ha iniciado. Este tiempo de retraso depende, además, de la composición del combustible, de la temperatura del aire en el interior del cilindro, así como de su presión. Por lo general, interesa un retraso pequeño en la combustión de los motores diesel. El valor numérico del NC indica el porcentaje en volumen de n-hexadecano ($C_{16}H_{34}$) contenido en una mezcla con metil-naftaleno ($C_{10}H_7CH_3$) con la cual se obtiene el mismo tiempo de retraso, a la autoinflamación que con el combustible objeto de análisis. Al cetano, combustible con poco tiempo de retraso se le asigna un calor de NC de 100, mientras que al metilnaftaleno, cuyo tiempo de retraso es ele-

vado, se le asigna un valor de 0. El NC de los aceites es adecuado, pues por lo general alcanza valores superiores a 45, que según la norma alemana DIN 51601 es el valor mínimo requerido para el correcto funcionamiento de los motores diesel.

- *Densidad:* la densidad de los aceites vegetales es de 0,91-0,94 g/cc a 15 ℃, mientras que la del gasóleo es de 0,81-0,86 g/cc aproximadamente.
- *Viscosidad:* el mayor obstáculo para el empleo de aceites vegetales como carburantes en motores diesel es la elevada viscosidad que presentan, del orden de 10 veces superior a la del gasóleo. En un motor Diesel la viscosidad del carburante no puede ser tan elevada pues esto conlleva a serios problemas en el sistema de inyección del motor, así como en el mecanismo de ruptura y pulverización de las gotas líquidas.

Ensayos realizados en los motores

Debido a toda la serie de inconvenientes que puede tener el uso de aceites vegetales como tales, en los motores diesel, tal y como ha quedado reflejado anteriormente, existe una alternativa que solventa el problema que es la mezcla de los aceites vegetales con gasóleo.

Se han realizado ensayos de corta y larga duración: los primeros demuestran que tanto para motores de ensayo como para vehículos que las mezclas (aceite + gasóleo) muestran un buen comportamiento del motor; por el contrario, en los ensayos de larga duración se ha comprobado que existen problemas de durabilidad de los motores y un aumento de emisiones de CO e hidrocarburos inquemados. Los principales problemas de los aceites vegetales como combustibles en los motores son, su elevada viscosidad y bajas volatilidades comparadas con el gasóleo.

En el punto 3 del DVD adjunto se muestra información complementaria sobre tipo de biocombustibles y motores accionados por aceites.

7.16.4.2. Biodiesel

En el año 2005 el consumo de biocarburantes en España representó tan sólo el 0,44% del mercado nacional de gasolinas y gasóleo para el transporte, según los datos proporcionados por la Asociación de Productores de Energías Renovables. Lo que significa que España deberá de multiplicar por 16 su actual cifra de consumo de biocarburantes para cumplir el objetivo de alcanzar en el 2010 el 5,83% del mercado nacional de combustibles fijado en el Plan de Energías Renovables. Este dato confirma el incumplimiento por parte española del objetivo de que los biocarburantes alcanzaran una cuota de mercado del 2% en 2005, tal y como indicaba la Directiva Europea 2003/30/CE.

En la Figura 4.16 se muestran los consumos de carburantes en España, expresado en miles de toneladas equivalentes de petróleo durante el año 2005.

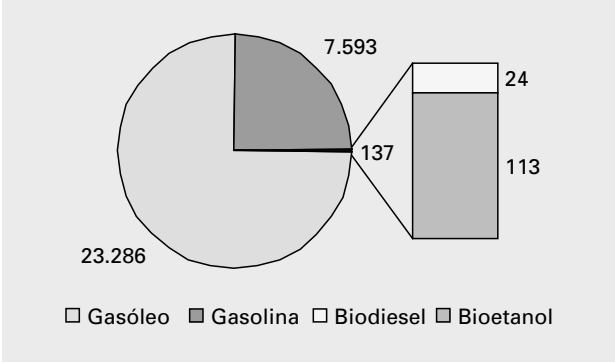


Figura 4.16. Consumo de carburantes en España en el año 2005 (expresado en miles de toneladas equivalentes de petróleo). (Fuente: Comisión Nacional de la Energía).

La utilización de los biocarburantes presenta diversas ventajas medioambientales, energéticas y socioeconómicas respecto a los combustibles convencionales derivados del petróleo que los convierte en un instrumento útil para el cumplimiento de las políticas comunitarias en materia de la lucha contra el cambio climático y de seguridad de suministro por la vía de la reducción de la dependencia del petróleo.

En la Tabla 4.20 se reflejan los beneficios energéticos, medioambientales, técnicos y operativos del biodiesel.

7.16.5. Proceso de obtención del biodiesel

El biodiesel es un biocarburante, formado por ésteres metílicos de los aceites. Estos se pueden mezclar con distintas proporciones con el gasóleo convencional y utilizarlos en vehículos diesel sin necesidad de introducir modificaciones importantes en los motores.

Tabla 4.20. Principales beneficios del biodiesel

ENERGÉTICOS	– Obtenido a partir de materias primas renovables. – Diversificación de las fuentes de energía. – Reducción de la dependencia de los combustibles sólidos.
MEDIO AMBIENTALES	– Puesta en práctica de la Ecología Industrial, cerrando el ciclo de un residuo altamente contaminante mediante su valorización para obtener un recurso energético. – Presenta un mínimo contenido de azufre. – Producto que se descompone biológicamente. – Reduce las emisiones contaminantes de los combustibles convencionales, debido a la baja concentración de CO_2 y SO_2 en las emisiones de humos. – Contribuye a la mejora en la conservación de la vegetación, los monumentos y fachadas históricas son afectadas por los gases que expulsan los combustibles normales, lo que implica una mejora en la calidad de vida de los ciudadanos.
TÉCNICO-OPERATIVOS	– El transporte, el almacenamiento y el manejo son más fáciles al tratarse de un producto no peligroso y sin riesgo de explosión. – Presenta gran flexibilidad, ya que puede ser mezclado en cualquier proporción con el gasóleo convencional. – Los motores no necesitan modificaciones para su uso. – Mejora la capacidad lubricante del combustible convencional. – Exención del Impuesto de Hidrocarburos (hasta 31/12/2012). – Ahorro en la depuración de aguas residuales (en torno al 25%), por la reducción de aceites vertidos.

Los aceites vegetales antes de ser utilizados como materia prima en fabricación de biocombustible o como materia prima en otros procesos deben de pretratarse. Las etapas más importantes para la obtención de biodiesel a partir de aceites vegetales usados son las siguientes:

- *Decantación-Centrifugación:* eliminación de sólidos en suspensión y materias sedimentables.
- *Secado:* es preciso eliminar la humedad que pueda llevar el aceite para evitar problemas posteriores en la calidad de los productos (biodiesel, glicerina, etc.).
- *Esterificación:* el caso de que el aceite tenga una acidez superior al 2%, se debe realizar previamente una esterificación, de esta forma se eliminan reacciones no deseadas de saponificación que generarían jabones. De la reacción del ácido graso con el alcohol se obtienen éster y agua.
- *Transesterificación:* los ésteres metílicos de los aceites se pueden obtener mediante diferentes tecnologías de transesterificación catalítica, en las que se hace reaccionar el aceite con alcohol de bajo peso molecular (normalmente metanol), en presencia de un catalizador (KOH ó NaOH) a temperatura y presión adecuadas. El resultado de esta reacción es el *biodiesel*, con un rendimiento en torno al 90% y como subproducto principal glicerina. La tecnología más ampliamente utilizada es la transesterificación en medio básico con metanol.
- *Lavado y secado del biodiesel:* el biodiesel está constituido principalmente por mezclas de ésteres metílicos pero también puede contener restos de jabones, glicerina, glicéridos, ácidos grasos libres, agua, etc. La presencia de estos compuestos afectan en mayor o menor medida a la calidad del biodiesel, por lo que con objeto de excluirlos, es necesario lavar el biodiesel. Para eliminar el agua de lavado es necesario el secado del mismo.
- *Tratamiento de la glicerina bruta:* el glicerol obtenido es una glicerina bruta con presencia de compuestos que no han reaccionado, restos de catalizador, metanol y biodiesel. Por este motivo es necesario realizar esta operación no sólo para valorizar la glicerina, sino también para optimizar la conversión de aceite en éster.

La glicerina, una vez purificada, se puede utilizar en aplicaciones tradicionales como cosmética, farmacia, fabricación de plásticos y jabones. El balance aproximado en la producción de biodiesel sería el siguiente: para la producción de 965 kg de biodiesel, serían necesarios 133 kg de metanol, 9,6 kg de catalizador y 1.000 kg de aceite, obteniéndose 178,9 kg de glicerina.

La Figura 4.17 resume el proceso de obtención del biodiesel.

7.16.5.1. Características de los aceites vegetales esterificados (biodiesel) con respecto al gasóleo

Las propiedades del biodiesel con respecto al gasóleo son bastante similares, de ahí que su utilización como combustible sea más adecuada que los aceites vegetales sin esterificar. A continuación se comparan las siguientes:

- *Poder calorífico:* la energía específica de los ésteres metílicos o etílicos no varía mucho con respecto a los aceites vegetales. Los valores del poder calorífico de estos ésteres son aproximadamente un 10% inferiores a los del gasóleo.

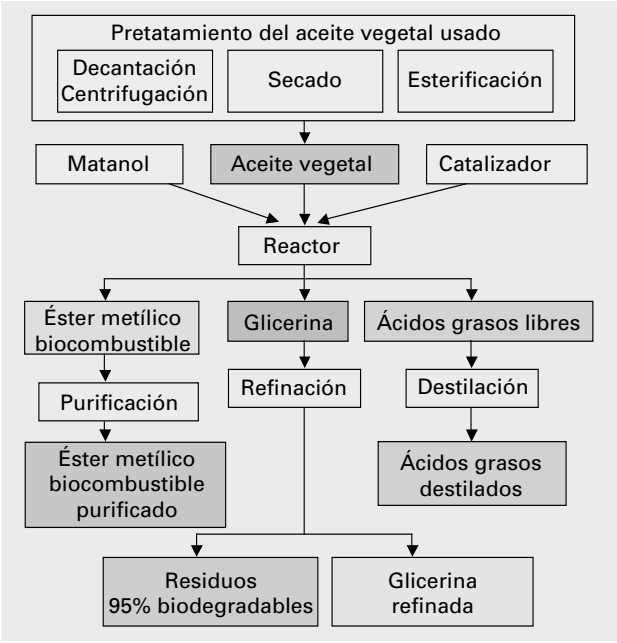


Figura 4.17. Producción de biodiesel.

- *Índice de cetano (autoinflamabilidad):* los NC de los ésteres son superiores a los de los aceites, llegándose a obtener en algunos casos NC de 65, aunque el intervalo satisfactorio oscila entre 50-55.
- *Viscosidad:* la viscosidad de los ésteres metílicos y etílicos es bastante próxima a la del gasoil, lo que eliminaría problemas sobre el buen funcionamiento del motor.
- *Densidad:* la densidad de los ésteres metílicos y etílicos suele ser 0,87-0,88 g/cc, próxima a los valores del gasóleo e inferior a los aceites vegetales.

7.16.5.2. Posibles problemas de arranque en frío con biodiesel

La mezcla de biodiesel al 20%, estándar de uso habitual de comprobada eficacia que da nombre al Biodiesel 20, aumenta en 2 ℃ la temperatura a la que debe mantenerse el combustible respecto a la temperatura del petrodiesel. En climas fríos esta diferencia podría hacer que el biodiesel presentara problemas en el filtro del motor o de escanciado desde el depósito de almacenado al ser demasiado viscoso con respecto al petrodiesel. Esto, aunque es bastante improbable puesto que se ha demostrado operativo sin inconvenientes a temperaturas ambientales de hasta –32 ℃, se podría subsanar con depósitos no expuestos a la intemperie o mecanismos de precalefactado del combustible en el motor.

7.16.5.3. Logística y comercialización del biodiesel

Dado que las características fisicoquímicas del biodiesel son similares a las de los hidrocarburos, pueden compartir la cadena del transporte, almacenamiento y distribución de los carburantes convencionales, especialmente cuando la concentración de biodiesel en la mezcla no es elevada.

El esquema de distribución más frecuente, que reproduce la Figura 4.18, consiste en transportar el gasóleo y el biodiesel por separado a una terminal intermedia donde se cargan camiones-cisterna, para su posterior distribución. Actualmente en España, todo el biodiesel y el gasóleo se transportan de forma separada y se almacena en depósitos dedicados para cada producto en las terminales de almacenamiento para su posterior mezcla en línea de brazo de carga en el camión cisterna. Esto supone la ventaja de la flexibilidad en la formulación de las mezclas con distintos porcentajes biodiesel/gasóleo.

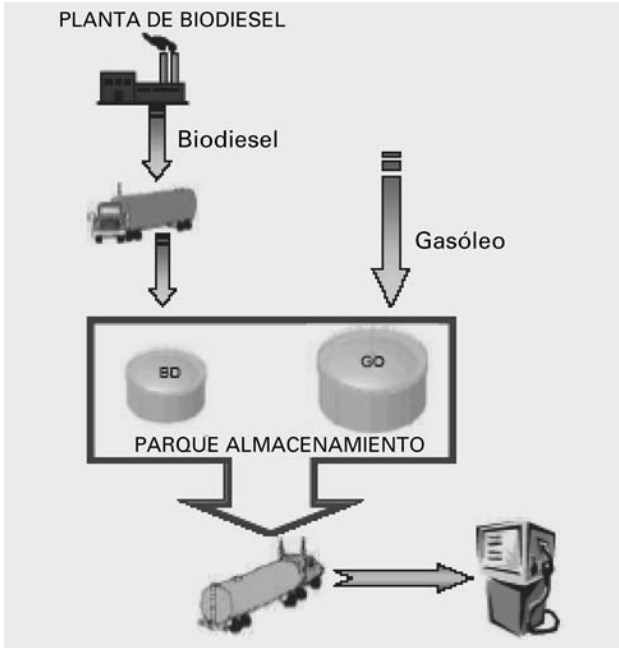


Figura 4.18. Cadena de distribución del biodiesel. (*Fuente:* Comisión Nacional de la Energía).

7.16.5.4 Aspectos medioambientales

Desde el punto de vista medioambiental, el biodiesel tiene la ventaja de ser una energía renovable, lo que la hace ser mejor sustituta de otras formas de energía fósil, como el petróleo. La utilización de biodiesel en la combustión de motores y calderas ofrece ventajas

medioambientales en comparación con el gasóleo convencional.

De los resultados obtenidos sobre la evaluación de las emisiones producidas por el uso de biodiesel en motores, se deriva que en el balance medioambiental del biodiesel es menos negativo que el del gasóleo, es decir, globalmente se reducen las emisiones.

En la Figura 4.19 se representa el porcentaje de emisiones de distintas sustancias que se producen con el biodiesel respecto a la utilización del gasóleo.

Los resultados de la Figura 4.19 permiten afirmar que con la utilización del biodiesel se pueden reducir todas las emisiones de los motores, excepto en el caso de NO_x, donde aumentan ligeramente con respecto al gasóleo. Estas emisiones están originadas por la disminución de las temperaturas del escape del motor, que a su vez conlleva una reducción del tiempo de retraso de encendido, y en consecuencia, un avance del punto de inyección. No obstante, existen varias soluciones al problema de las emisiones de NO_x:

- Retardo del punto de inyección del motor. Esta solución, aunque es efectiva supondría la modificación del motor, que reduciría las ventajas del biodiesel.
- Utilización de un catalizador de oxidación, que reduciría las emisiones oxidando la fracción soluble del combustible. De esta forma, se reducirían, además de las emisiones de óxidos de nitrógeno, las emisiones de partículas, hidrocarburos y monóxido de carbono.

Por otra parte, y respecto a la utilización del biodiesel como combustible en calderas y calefacciones también se reducen considerablemente las emisiones contaminantes:

- Reducción de prácticamente el total de las emisiones de partículas.
- Reducción del 75% de las emisiones de monóxido de carbono.
- Reducción de un 40% de las emisiones de óxidos de nitrógeno.
- No se producen emisiones de compuestos aromáticos ni de óxidos de azufre.

En cuanto a las emisiones de CO_2, la utilización de biocarburantes no aumenta el nivel de las mismas en la atmósfera, ya que las emisiones de dióxido de carbono, generadas durante la combustión del biocarburante en motores o calderas, se reabsorben, a través de la fotosíntesis, en las plantas. En el caso de los combustibles fósiles, el carbono que se libera a la atmósfera es el que se ha fijado a la tierra durante millones de años.

Además el biodiesel es biodegradable (98,3% en 21 días) y no tóxico. De esta forma, además se evita la contaminación de las tierras y la contaminación de las aguas subterráneas.

7.16.5.5. Valoración económica del biodiesel

El principal problema de la producción de biodiesel a partir de aceites vegetales es su mayor coste en la producción con respecto al gasóleo mineral. Dado que el coste de obtención del biodiesel es superior al precio del gasóleo, la Unión Europea propone una serie de medidas para que puedan competir con los productos derivados del petróleo.

La contribución del coste de producción del gasóleo con respecto a su precio es sólo del 15%, siendo el 85% restante los impuestos que gravan el gasóleo. Esto significa que el precio del gasóleo (con impuestos) y el precio del biodiesel procedente de aceites vegetales (sin impuestos) son aproximadamente iguales. En este sentido, para posibilitar su entrada en el mercado energético será necesario reducir y anular los impuestos y favorecer los incenti-

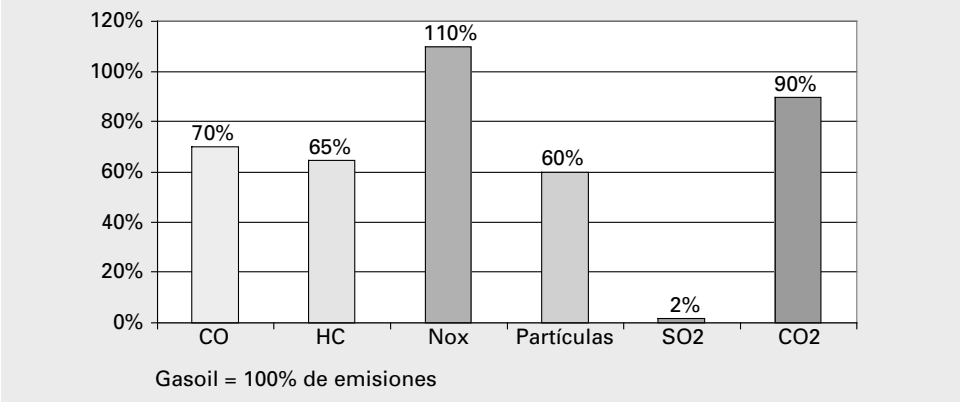


Figura 4.19. Comparación de emisiones entre el biodiesel y el gasóleo. (*Fuente:* Empresa Pública para el Desarrollo Agrario y Pesquero. Junta de Andalucía).

vos fiscales. Ahora bien, la legislación comunitaria actual permite eximir a los biocarburantes en proyectos piloto y, más a largo plazo, podrían beneficiarse de una exención o reducción de sus impuestos generalizada. Además, habría que considerar también los beneficios procedentes de la venta de los productos secundarios.

La materia prima más económica a partir de la cual se podrían reducir mayoritariamente los costes es a partir de los aceites vegetales usados, así se consigue reducir el coste de la materia prima en un 90%.

El régimen fiscal de los biocarburantes aplicado en toda la Unión Europea autoriza a los estados miembros conceder una exención en el ámbito de los proyectos piloto, para el desarrollo tecnológico de productos más favorables para el medio ambiente. Sin embargo, no permite seguir considerando exentos tales productos una vez hayan concluidos los proyectos piloto, esto es, cuando los biocarburantes se fabriquen sobre distintas bases industriales.

A medio plazo es de esperar que el coste de adquisición del petrodiesel aumente (debido al incremento del petróleo) con lo que, definitivamente, el uso de los carburantes renovables aumentará.

7.16.6. Mezclas de biodiesel y gasóleo de automoción

Los aceites vegetales tiene un poder de disolución mayor que el gasóleo, y al aportar más lubricidad, favorecen la conservación del motor. Para evitar que las piezas de caucho (manguitos, juntas, etc.) se desgasten prematuramente, el biodiesel suele mezclarse con gasóleo en proporciones inferiores al 30%.

Si bien el biodiesel se puede utilizar sólo o mezclado con gasóleo derivado del petróleo, las experiencias demuestran que para los motores diesel actuales, sin modificarlos, se aconsejan mezclas de biodiesel en proporciones menores al 30%.

Las emisiones a la atmósfera que se producen al utilizar como combustible en motores la mezcla B20 (80% de gasóleo y 20% de biodiesel) con respecto al gasóleo son las que se muestran en la Tabla 4.21.

7.16.7. Uso del aceite como materia prima en la industria

Una vez valorizados los aceites vegetales usados, son aptos para ser empleados como materia prima en procesos de transformación química y obtener una gama de productos con aplicación en la industria cosmética, farmacéutica, de lubricantes, fluidos hidráulicos, surfactantes o emulsionantes.

Tabla 4.21. Emisiones a la atmósfera del B20 con respecto al gasóleo

Compuestos	Emisiones con respecto al gasóleo
Monóxido de carbono	–12,6%
Hidrocarburos	–11%
Partículas –	18%
Óxidos de nitrógeno	+1,2%

Después de que se eliminen las impurezas que puedan contener los aceites procedentes de los procesos de fritura, pueden ser sometidos a una reacción hidrolítica, tras la cual los ácidos grasos se separan de la molécula de glicerol, como muestra la Figura 4.20.

El producto resultante de esta reacción es una capa acuosa que lleva glicerina en la disolución, y otra aceitosa que contiene los ácidos grasos. La principal dificultad de esta reacción es la inmiscibilidad del agua y la grasa al desdoblar, por lo que deberían ajustarse los parámetros de agitación, presión, temperatura y catalizadores para provocar la mezcla total de la fase pesada con el agua.

Los productos resultantes de la reacción de desdoblamiento son aguas glicerinosas, de las cuales se puede obtener la *glicerina* concentrándola por procesos de evaporación y destilación, y *ácidos grasos*; dichos ácidos grasos pueden ser destinados a la fabricación de jabón o bien ser separados para su empleo en varias aplicaciones, tal y como se muestra en Tabla 4.22.

Una vez hidrolizado el aceite, se pueden separar los ácidos grasos constituyentes de los aceites utilizando distintas técnicas:

- *Por enfriamiento:* para que cristalicen los de carácter saturado, y subsiguiente cristalización.
- *Por destilación-rectificación:* a presiones reducidas.
- Por destilación molecular.

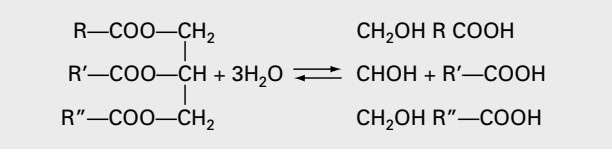


Figura 4.20. Reacción hidrolítica de los aceites vegetales.

Tabla 4.22. Aplicaciones de los ácidos grasos

Aplicación	C(22:0)	C(22:1)	C(18:0)	C(18:1)	C(16:0)	C(14:0)	C(12:0)	C(10:0)	C(8:0)
Jabones y tensoactivos			X	X	X	X	X		
Cosméticos. Productos farmacéuticos			X	X	X	X	X	X	X
Productos textiles		X	X		X	X			
Pinturas y barnices		X	X	X	X			X	X
Caucho			X	X		X		X	X
Velas y ceras	X		X	X					
Desinfectantes e insecticidas				X				X	X
Plásticos		X	X	X			X	X	X
Papelería			X	X					
Lubricantes			X	X					
Emulgentes, agentes de flotación		X	X	X	X		X	X	X

C(22:0): ácido behénico
C(22:1): ácido erúcico
C(18:0): ácido esteárico
C(18:1): ácido oleico
C(16:0): ácido palmítico
C(14:0): ácido mistírico
C(12:0): ácido láurico
C(10:0): ácido decanoico
C(8:0): ácido octanoico

7.16.7.1. Utilización de aceites en la industria cerámica

La adición de aceites vegetales en la fabricación de productos de cerámica estructural o roja, como agente plastificante tiene unos resultados altamente satisfactorios. La adición de productos orgánicos puede mejorar la resistencia mecánica en crudo, cambiar la plasticidad y la cantidad de agua de interposición del sistema y disminuir la contracción de secado en los materiales cerámicos. Los productos que contienen carbón favorecen la expansión de la arcilla. La adición de aceite en cantidades superiores al 8% disminuye la resistencia mecánica y, según el tipo de arcilla tiene grandes problemas de mezcla y plasticidad.

El componente principal de los aceites de girasol y de colza, el ácido oléico lleva camino de convertirse en un elemento imprescindible en la industria del tratamiento de superficies (también pueda decirse de la industria farmacéutica, la de polímeros o la de lubricantes). Durante la oxidación se descompone, a su vez en otros dos ácidos capaces de precipitar, selectivamente, metales pesados (Ni, Cu o Zn).

8. Constituyentes de los residuos potencialmente peligrosos

La Tabla 4.23 muestra un listado de los constituyentes de los residuos que, por sus características, deben ser controlados.

Es obvio que, a priori, ni las fábricas que elaboran estos compuestos, ni los productos manufacturados con ellos han de ser necesariamente un problema. No obstante la tabla se reproduce a título de información ya que los compuestos citados, cuando el producto que los contenga devenga residuo, deberá ser tratado con cuidado.

8.1. PRODUCTOS TÓXICOS Y RESIDUOS CONTAMINANTES

Este título no obedece ni a criterios técnicos ni legales, sino al espíritu de esta obra donde pretende indicar, con independencia de la toxicidad, los residuos a los que dan lugar determinados compuestos químicos.

Los COP's (contaminantes orgánicos persistentes), naturalmente pueden tratarse, pero los esfuerzos de la sociedad científica, política y empresarial deberían ir encaminados a su erradicación, como en su día se hizo con el DDT. Otros, tan usados como los pañales, han encontrado diversas vías de reciclaje.

En el año 2006 se ha publicado un estudio en la revista *The Lancet* que alerta sobre 202 compuestos quimicos identificados como tóxicos para el cerebro humano. Este estudio afirma que millones de personas en el mundo podrían haber sufrido daño cerebral en la infancia debido a la contaminación ambiental provocada por estos compuestos, entre los que se menciona al plomo, el metilmercurio, los PCB, el arsénico y el tolueno.

Tabla 4.23. Listado de residuos que deben ser controlados

Berilio y sus compuestos.
Compuestos de vanadio.
Compuestos hexavalentes de cromo.
Compuestos de cobalto.
Compuestos de níquel.
Compuestos de cobre.
Compuestos de zinc.
Arsénico y sus compuestos.
Compuestos de plata.
Cadmio y sus compuestos.
Compuestos de estaño.
Antimonio y sus compuestos.
Teluro y sus compuestos.
Bario y sus compuestos.
Mercurio y sus compuestos.
Talio y sus compuestos.
Plomo y sus compuestos.
Sulfuros inorgánicos.
Fluoruros inorgánicos, excluyendo los fluoruros de calcio.
Cianuros inorgánicos.
Litio, sodio, potasio, calcio y magnesio, y sus formas no combinadas.
Soluciones ácidas, o ácidos en forma sólida.
Asbestos (polvo y fibras).
Compuestos orgánicos de fósforo.
Carbonilos metálicos.
Peróxidos.
Cloratos.
Percloratos.
PCB's, PCT's y PBB's.
Compuestos farmacéuticos y veterinarios.
Sustancias biocidas y fitosanitarias.
Sustancias infecciosas.
Cresoles.
Isocianatos, tiocianatos.
Cianatos orgánicos.
Fenoles y sus compuestos, incluyendo clorofenoles.
Éteres.
Disolventes orgánicos halogenados.
Disolventes orgánicos excluyendo los halogenados.
Compuestos organohalogenados excluyendo materiales polimerizados inertes.
compuestos aromáticos policíclicos y heterocíclicos.
Compuestos orgánicos nitrogenados, especialmente aminas alifáticas.
Compuestos orgánicos nitrogenados, especialmente aminas aromáticas.
Sustancias de carácter explosivo.
Compuestos orgánicos de azufre.
Todo material contaminado con cualquier policlorado dibenceno furano.
Todo material contaminado con cualquier policlorado dibenceno p-dioxina.
Hidrocarburos y sus compuestos oxigenados, nitrogenados y sulfurados no citados.

La exposición a estas sustancias en las etapas tempranas de desarrollo fetal pueden dañar el cerebro a partir de dosis mucho más bajas que las que afectan a las funciones del cerebro de un adulto. Estos contaminantes neurotóxicos producen cambios en el comportamiento, pérdida de concentración, impulsividad, mayor agresividad, ralentización en la coordinación, daños en la memoria y daños en la capacidad de lenguaje. Debido a que la mayor parte de las personas nacidas entre 1960 y 1980 cuando niños estuvieron expuestos a sustanciales cantidades de plomo proveniente de la gasolina es posible que se haya reducido el porcentaje de niños con cociente intelectual superior (más de 130 puntos) y se haya incrementado el número de individuos con cocientes de menos de 70 en este grupo etéreo.

El epílogo se puede sintetizar en que los COP's no deben fabricarse, pero las ingentes cantidades existentes deben tratarse, en su sinónimo de destruirse, mientras que una infinidad de residuos contaminantes, con independencia de su toxicidad, deben reciclarse a través de una de las tecnologías expuestas en el capítulo anterior.

8.2. LOS COP'S Y EL CONVENIO DE ESTOCOLMO

Los COP's, de acuerdo con el artículo 1 del Convenio de Estocolmo, son compuestos que comparten varias características:

- Son tóxicos para el ser humano y la vida silvestre (con efectos crónicos irreversibles).
- Son persistentes y se desplazan a grandes distancias desde las regiones más cálidas a las más frías del planeta.
- Se bioconcentran y biomagnifican en las cadenas alimenticias con lo que llegan a contaminar la leche materna con las imprevisibles consecuencias que ello acarrea.

El Convenio de Estocolmo establece que se deben tomar medidas drásticas para la eliminación de los PCB's. Por esta nomenclatura se conoce a una amplia gama de compuestos cada uno de los cuales contiene de uno a diez átomos de cloro en un anillo bifenílico, muy usados en la industria eléctrica (con nombres comerciales como *Askarel* y *Piralenos*) y que forman parte de los sistemas de refrigeración, de transformadores eléctricos situados en postes de líneas de transporte o en el interior de edificios, equipos electrónicos (disolventes, condensadores y elementos ignífugos, como fluidos refrigerantes e hidráulicos en diversas industrias). La mayor posibilidad de exposición del hombre a los efectos de los PCB's es a través del consumo de pescado. Existen algunos sistemas de tratamiento para la eliminación de las enormes cantidades de PCB's, sobre todo de la industria eléctrica, si bien la más aconsejada y segura es la incineración.

Además existen, también en el listado de COP's, ocho plaguicidas: aldrín, dieldrín, endrín, cordano,

heptacloro, mirex, toxafeno y hexaclorobenceno, éste último usado como fungicida para el tratamiento de semillas, aunque se exceptúa su empleo como materia prima intermedia para otros procesos. En el caso del DDT (Artículo 3, anexo B) se permite su utilización para el control del paludismo y como producto intermedio para la producción del insecticida dicofol, si bien deben registrarse en la OMS.

El Convenio de Estocolmo también contempla que los países que se adhieran puedan solicitar algunas excepciones específicas temporales para algunos plaguicidas (Artículo 4).

Con respecto a las dioxinas y furanos, compuestos organoclorados que no se producen industrialmente sino que se generan como consecuencia de un sinfín de actividades: hábito de fumar, incendios de toda naturaleza (conviene recordar que se han encontrado dioxinas y furanos en restos fósiles de millones de años) o en procesos industriales, el Convenio propugna la «continua minimización y su tratamiento» para evitar su emisión al medio (Artículo 5. Anexo C).

El Convenio de Estocolmo establece en su Artículo 10 que las autoridades deben facilitar y promover información al público sobre los COP's y sus alternativas. Se promueve la asistencia técnica y económica a países en vías de desarrollo y, finalmente hay que indicar que existe un vínculo legal entre el tráfico ilegal de plaguicidas COP's prohibidos y los Convenios de Basilea y Rotterdam.

En el año 2006 se han celebrado en la Universidad de Almeria, España, la «Cuarta Conferencia Europea sobre pesticidas y contaminantes en el medio ambiente» y el *X Simposio sobre química y pesticidas modernos* en los que se debatieron temas como los efectos a largo plazo sobre las personas de los residuos de pesticidas y otros contaminantes, desconociéndose hasta el momento si pueden provocar algún tipo de enfermedad crónica o si por el contrario son inocuos.

8.3. LOS PAÑALES USADOS

En el año 1961, la compañía *Procter and Gamble* introdujo los pañales desechables. La comodidad de este tipo de pañales de usar y tirar frente a su impacto medioambiental ha generado numerosas polémicas entre los fabricantes y las asociaciones de defensa del medio ambiente.

Poco a poco las compañías han ido reduciendo el cloro empleado para blanquear los pañales y en algunos países, como Estados Unidos, se están empezando campañas de reciclaje de pañales. Además, ya han surgido marcas de pañales, como la danesa *Abena*, que garantizan que sus productos respetan el medio ambiente al utilizar plásticos reciclables y papel de la tala controlada de los bosques escandinavos, donde se plantan más árboles que los que se talan.

8.3.1. Reciclado de pañales usados

Knowaste LLC, con sede en Toronto, Canadá, es una compañía privada dedicada al desarrollo y aplicación de innovadoras soluciones medioambientales para el tratamiento de cierto tipo de residuos. El reciclaje de pañales usados estará disponible en Melbourne, con plantas en Sydney, Brisbane y Perth como parte de un servicio de distribución y reciclaje de pañales a domicilio ofrecido por SGS Australia. El programa, conocido localmente como «*My Planet Recycling*,»

Los pañales desechables (tanto para niños como para adultos) suponen importantes problemas para la comunidad mundial a medida que la población crece y envejece y se establecen nuevas medidas normativas, se reduce la capacidad de los vertederos y aumenta la preocupación y concienciación de la conservación medioambiental:

- El uso de pañales desechables ha crecido enormemente en los últimos 20 años como resultado de su comodidad; del 40% de padres que los empleaban en 1993 la cifra ha crecido hasta el 91% actual en Australia.
- El número de personas por encima de los 65 años se ha triplicado en el último medio siglo hasta una cifra récord de 420 millones de personas en todo el mundo, con los que cada vez más ancianos dependen de estos pañales desechables.
- Cada año, más de 800 millones de pañales desechables se usan en Australia, lo que genera una cantidad de residuos sólidos de 110.000 toneladas al año.
- Cada niño que emplea pañales desechables generará aproximadamente una tonelada de desechos antes de comenzar a usar el retrete.
- Un pañal desechable puede tardar más de 500 años en descomponerse, lo que hace eterna su presencia en los vertederos. Los pañales desechables almacenados en los vertederos que contienen residuos humanos no tratados, suponen una importante amenaza de contaminación para las reservas de agua subterránea.

El reciclado de pañales es necesario y sencillo. El procesador de Knowaste sanea y recicla los princi-

pales componentes de los pañales: celulosa y plástico. El plástico reciclado puede emplearse en la producción de madera plástica, placas para tejados y apartaderos de vinilo. La celulosa de fibra larga puede tener distintas aplicaciones como papel para paredes, plantillas para zapatos y filtros de aceite. Knowaste ha probado con sus operaciones en Europa que existen un mercado viable y rentable de productos reciclados.

En EE UU, Knowaste opera dos instalaciones de procesamiento en Arnhem en los Países Bajos y en Santa Clarita en California, EE UU, que separan y desinfectan los materiales plásticos, las fibras de madera y los polímeros superabsorbentes contenidos en los pañales. Estas materias primas se venden luego a los fabricantes para su reutilización como plantillas para zapatos, tejas, filtros para gasolina y papel pintado para paredes. (Para más información: http://www.knowaste.com).

8.3.2. Pañales usados y cultivo de setas

La investigadora mexicana, Rosa María Espinosa ha conseguido hacer crecer setas en pañales usados, que otrora tardarían 300 años en degradarse. Desde ese día han pasado 12 años en los que esta mexicana, y después de varios ensayos, finalmente logró degustar setas en su laboratorio. El proceso no tarda más de tres meses y consiste en esterilizar los pañales para después rociarlos con las esporas del hongo y exponerlos durante un mes más a la luz para su crecimiento.

Una de sus colaboradoras, Silvie Turpin, ha asegurado que «el objetivo no es la producción de hongos sino degradar el pañal», cuya celulosa, después del proceso, se reduce en un 80%. Aunque, en principio resulte desagradable, «habría que recordar que los hongos suelen cultivarse en estiércol de caballo y vaca que nadie esteriliza». Las investigadoras sueñan con que su fórmula permita crear una industria enfocada a la degradación o reciclaje del pañal, aunque aceptan que todavía necesitan perfeccionarla. (Fuente: AFP).

8.4. TRANSFORMACIÓN DE RESIDUOS DE ANIMALES

Los subproductos de animales se definen como cuerpos enteros (o partes) de animales o productos de origen animal no destinados al consumo humano, incluidos óvulos, embriones y esperma, derivados del procesado de los mismos para la obtención de alimentos para consumo humano u otro uso. Antiguamente se consideraban como un subproducto con un valor añadido que podía emplearse en la industria alimenticia para la obtención de harinas cárnicas, huesos, grasas y gelatina, así como en la industria cosmética, farmacéutica, etc.

Como es bien sabido, la epidemia de encefalopatía espongiforme bovina (EEB) que asoló gran número de explotaciones ganaderas durante los años 90 en países como Gran Bretaña, Francia, Estados Unidos, España, Suiza, Israel, Japón, etc., evidenció la gestión incorrecta de estos subproductos, así como su importancia en la propagación de las enfermedades animales transmisibles, lo que auspició en su día y, en el ámbito de la UE, la aparición de diferentes leyes, normas y directrices de ámbito europeo, nacional y autonómico con el objeto de controlar estos residuos y marcar las pautas de su tratamiento y eliminación.

En España se generan anualmente unas 300.000 toneladas de este tipo de residuo, de las cuales, por especies y en número de individuos son los siguientes; 250.000 cadáveres de ganado vacuno, 890.000 de porcino, 21.000 de equino, 1,4 millones de ovino y caprino, 1,86 millones de conejos y 6,6 millones de avícola. En el ámbito de la Unión Europea, estas cifras superan los diez millones de toneladas.

La causa de la EEB radicó en el empleo de harinas cárnicas para la alimentación del ganado bovino, provocando esta enfermedad degenerativa cerebral en vacas de 4 y 5 años de edad, en forma de incoordinación motora, ataxia (inestabilidad) y apatía en el animal, produciendo la muerte del individuo antes de 6 meses. La EEB parece que fue causada por la presencia de priones anormales (proteínas de la superficie de células nerviosas) procedentes piensos enriquecidos con harinas de carne y huesos de ovejas y, con capacidad para infectar a otras células.

Las harinas cárnicas son resultantes del tratamiento de subproductos animales en los procesos industriales denominados «*rendering*» y su empleo como suplemento proteico se remonta a mediados del siglo XX. Según estudios sobre el origen de la enfermedad, parece que esta se remonta a los años 70, cuando unas variaciones en los procesos industriales de «*rendering*», concretamente en los pasos de fusión y extracción por disolventes, redujeron las temperaturas en los mismos y, en consecuencia, favorecieron las condiciones de supervivencia del agente infeccioso.

Actualmente, es el reglamento de la Unión Europea n.º 178/2.002 el que establece las normas sanita-

rias aplicables a los subproductos animales no destinados al consumo humano, tomando siempre como premisa el garantizar el máximo nivel de salud y de seguridad a lo largo de toda la cadena alimentaria hasta alcanzar al consumidor final.

En la Tabla 4.24 se incluye la catalogación prevista en este reglamento para todos los subproductos animales a los que resulta de aplicación el mismo. Además, establece las pautas a seguir para su recogida, transporte, almacenamiento, tránsito, tratamiento, eliminación y/o comercialización y control. En concreto, para las plantas de transformación, el reglamento establece una diferencia entre las que tratan materiales de categoría 1 (Tabla 4.24) y 2 (Tabla 4.25) y, por otro lado, de categoría 3 (Tabla 4.26).

En ambos casos, este reglamento establece los requisitos indispensables para lograr la autorización de la autoridad competente, que dependerá de la naturaleza de las instalaciones, el diseño de los locales, la higiene del personal, la protección contra las plagas (como insectos, roedores y aves), la evacuación de las aguas residuales, la temperatura de almacenamiento, y la limpieza y desinfección de las instalaciones y los vehículos.

En el Capítulo III del Anexo V de este reglamento, se establecen siete métodos de transformación que varían en función de la categoría del residuo, su granulometría, la temperatura alcanzada en el proceso de tratamiento térmico, la presión aplicada y la duración del proceso, tal y como se refleja en la Tabla 4.27.

Estos procesos de «*rendering*» o transformación se componen básicamente de los siguientes pasos:

- Trituración hasta calibre menor del establecido en la legislación vigente.
- Tratamiento térmico en digestores para evaporar el agua, resultando como producto final la mezcla de harina de carne y grasa animal.
- Prensado para separar la grasa animal de la harina de carne.
- Esterilización en condiciones ambientales establecidas en la legislación vigente.

De forma paralela, se completan estos procesos con los siguientes tratamientos auxiliares.

- Desodorización de gases del proceso.
- Depuración y/o recirculación de aguas residuales.
- Enfriamiento de los vapores del proceso.

Para este tipo de procesos y, según contempla el Reglamento anteriormente citado, la autoridad com-

Tabla 4.24. Residuos de animales. Materiales de categoría 1

MATERIAL DE CATEGORÍA 1	
Catalogación	**Tratamiento y eliminación**
Animales sospechosos de estar infectados por una EET.	Eliminación directa mediante incineración en una instalación autorizada.
Animales en los que se haya confirmado oficialmente la presencia de una EET.	Transformación en una instalación autorizada y eliminación final mediante incineración o co-incineración en una instalación autorizada.
Animales sacrificados en aplicación de medidas de erradicación de la EET.	Transformación, salvo los casos afectados por ETT, en una instalación autorizada y eliminación final en un vertedero controlado autorizado.
Animales de compañía, de zoológico y de circo.	Los residuos de cocina se eliminarán en un vertedero controlado autorizado.
Animales de experimentación.	Eliminación directa mediante incineración en una instalación autorizada.
Animales salvajes sospechosos de estar infectados con enfermedades transmisibles a los seres humanos o los animales.	Eliminación directa mediante incineración en una instalación autorizada.
Material especificado de riesgo (MER).	Transformación en una instalación autorizada y eliminación final mediante incineración o co-incineración en una instalación autorizada.
Animales muertos que contengan material especificado de riesgo, cuando en el momento de la eliminación el material especificado de riesgo no se haya retirado.	Eliminación directa mediante incineración en una instalación autorizada.
Productos derivados de animales a los que se hayan administrado sustancias prohibidas.	Transformación en una instalación autorizada y eliminación final mediante incineración o co-incineración en una instalación autorizada.
Productos de origen animal que contengan residuos de contaminantes medioambientales.	Eliminación directa mediante incineración en una instalación autorizada.
Todo el material de origen animal recogido al tratar y eliminar el material de la categoría 1.	
Residuos de cocina procedentes de medios de transporte que operen a nivel internacional.	
Mezclas de material de la categoría 1 con material de las categorías 2 o 3.	

(Zona sombreada, completada por el autor).

Tabla 4.25. Residuos de animales. Materiales de categoría 2

MATERIAL DE CATEGORÍA 2	
Catalogación	**Tratamiento y eliminación**
Estiércol y contenido del tubo digestivo.	Compostaje del material derivado de pescado.
Materiales de origen animal recogidos al depurar las aguas residuales de mataderos distintos a los que se aplica la categoría 1.	Eliminación directa mediante incineración en una planta de incineración autorizada.
Productos de origen animal que contengan niveles superiores a los permitidos de determinados medicamentos veterinarios y contaminantes.	Transformación en una planta autorizada. En el caso de las grasas fundidas, transformación en derivados grasos para su uso en abonos y enmiendas del suelo orgánicos.
Productos de origen animal distintos del material de la categoría 1 importados de terceros países y que no cumplan los requisitos veterinarios.	Compostaje o fermentación anaerobia (biogás) del estiércol, contenido del tubo digestivo separado del tubo digestivo, leche y calostro.
Animales o partes de animales que mueran sin ser sacrificados para el consumo humano.	Disecación de cuerpos enteros o partes de animales salvajes de los que no se sospecha que estén infectados con enfermedades transmisibles a los seres humanos o animales.
Animales o partes de animales sacrificados para erradicar una enfermedad epizoótica.	
Mezclas de material de la categoría 2 con material de la categoría 3.	

Tabla 4.26. Residuos de animales. Materiales de categoría 3

MATERIAL DE CATEGORÍA 3	
Catalogación	**Tratamiento y eliminación**
Partes de animales sacrificados aptas para el consumo humano no se destinadas a este fin por motivos comerciales.	Incineración en una planta de incineración autorizada.
Partes de animales sacrificados no aptas para consumo humano sin presentar indicio de enfermedad transmisible.	Materia prima en una fábrica de alimentos para animales de compañía.
Pieles, pezuñas, cuernos, cerdas y plumas de animales que sacrificados en matadero y que sean aptos para consumo humano.	Transformación en una planta técnica, de biogás, de compostaje o de incineración autorizada.
Sangre de animales que no sean rumiantes, sacrificados en matadero y que sean declarados aptos para consumo humano.	Compostaje o transformación en una planta de biogás, si se trata de residuos de cocina de la categoría 3.
Subproductos animales derivados de la elaboración de productos destinados al consumo humano.	Ensilado o compostaje, si se trata de materias primas derivadas del pescado.
Antiguos alimentos de origen animal que no sean residuos de cocina no destinados a consumo humano por motivos comerciales.	Transformación en una planta técnica, de biogás, de compostaje o de incineración autorizada.
Leche cruda de animales que no presenten signos de enfermedad transmisible.	Transformación en una planta técnica, de biogás, de compostaje o de incineración autorizada.
Peces u otros animales marinos, con excepción de los mamíferos, capturados en alta mar para la producción de harina de pescado.	Transformación en una planta técnica, de biogás, de compostaje o de incineración autorizada.
Subproductos frescos de pescado procedentes de instalaciones industriales que fabriquen productos a base de pescado destinados al consumo humano.	Transformación en una planta técnica, de biogás, de compostaje o de incineración autorizada.
Conchas y cáscaras de huevo con fisuras procedentes de animales que no presenten signos de enfermedad transmisible.	Transformación en una planta técnica, de biogás, de compostaje o de incineración autorizada.
Sangre, pieles, pezuñas, plumas, lana, cuernos y pelo procedentes de animales que no presenten signos de enfermedad transmisible.	Transformación en una planta técnica, de biogás, de compostaje o de incineración autorizada.
Residuos de cocina que no pertenezcan a la categoría 1.	

(Zona sombreada, completada por el autor).

petente tiene potestad para efectuar inspecciones y controles en las plantas autorizadas a intervalos regulares, mediante el control de las condiciones generales de higiene en las instalaciones, el equipo y el personal, la eficacia de la auto supervisión de la planta, las normas a las que responden los productos después de su tratamiento, las condiciones de almacenamiento, la descripción del proceso y la identificación de los puntos críticos de control (PCC).

En el mercado existen varias empresas, dedicadas al diseño, fabricación e instalación de los equipos necesarios para una instalación de este tipo, adaptando las condiciones de trabajo a las necesidades de cada caso bajo los requerimientos de la normativa vigente.

Tal y como se contempla en el Plan Nacional Coordinado de Actuación y Lucha contra la Encefalopatía Espongiforme Bovina (EEB) y dentro del acuerdo marco suscrito entre el Ministerio de Agricultura y la Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (OFICEMEN), y los acuerdos locales entre administraciones autonómicas y cementeras, las harinas obtenidas se destruyen en los hornos de dichas industrias. Para ello, las harinas deberán cumplir unos requisitos de contenido máximo de materia grasa, granulometría, humedad, etc., de tal modo que, tras soportar las altas temperaturas y el tiempo de residencia de estos procesos, se garantiza su total destrucción.

Tabla 4.27. Métodos recomendados de trabajo para productos animales

Calibre máximo	Condiciones mínimas de trabajo			Tipo de proceso
	Temperatura (°C)	Presión (bar)	Tiempo (minutos)	
MÉTODO 1. REDUCCIÓN				
50 mm	133	3	20	Sistema de presión continua o discontinua.
MÉTODO 1. REDUCCIÓN				
150 mm	100		125	Sistema de presión discontinuo, alcanzando los requisitos de tiempo y temperatura al mismo tiempo.
	110		120	
	120		50	
MÉTODO 3. REDUCCIÓN				
30 mm	100		95	Sistema de presión continua o discontinua, alcanzando los requisitos de tiempo y temperatura al mismo tiempo.
	110		55	
	120		13	
MÉTODO 4. REDUCCIÓN				
30 mm	100		16	Sistema de presión continua o discontinua, alcanzando los requisitos de tiempo y temperatura al mismo tiempo.
	110		13	
	130		3	
MÉTODO 5. REDUCCIÓN				
20 mm	Hasta coagulación	Hasta separación agua-grasa/harina		Sistema de presión continua o discontinua, alcanzando los requisitos de tiempo y temperatura al mismo tiempo.
	80	120		
	100	60		
MÉTODO 6. REDUCCIÓN. SOLO PARA SUBPRODUCTOS DEL PESCADO				
Variable	Reducción de pH con ácido fórmico y almacenamiento posterior hasta estabilización			Sistema de presión continua o discontinua.
	A determinar según el caso.		A determinar según el caso.	
	Separación de líquido, grasas y chicharrones por medios mecánicos. Deshumidificación de la fracción líquida y concentrado de fracción sólida.			
MÉTODO 7. CUALQUIER SISTEMA QUE DEMUESTRE ALCANZAR LAS SIGUIENTES NORMAS MICROBIOLÓGICAS				
Tras el tratamiento térmico aplicado:				
			Ausencia de *clostridium perfringens*.	
Durante el almacenamiento o a la salida del mismo:				
			Ausencia de salmonella en 5 muestras de 25 gramos.	
			Presencia de enterobacteria ceae en alguno de estos casos:	
				Menos de 10 bacterias en 5 muestras.
				Menos de 300 bacterias en una de las 5 muestras.
				Entre 10 y 300 bacterias en 2 de las 5 muestras y, en las otras 3, hay menos de 10 bacterias.

Por último, numerosos institutos y los borradores de la UE sobre el tratamiento de los SPA (Subproductos de animales) y MER (Materiales específicos de riesgo) concluyen que:

- Los procesos de biodegradación, no son un método seguro para los SPA.
- La hidrólisis a alta presión (y también la alcalina), es un método seguro para los SPA de categorías 1, 2 y 3.
- La producción de biodiesel, es un método probablemente seguro para la eliminación de los SPA de categorías 2 y 3.

- La gasificación y pequeños incineradores, es un método seguro para la eliminación de los SPA de categorías 2 y 3.
- La incineración, es un método seguro para la eliminación de los SPA de categorías 1, 2 y 3 y los MER.

En octubre de 2007 el Consejo de Ministros aprobó el Plan Nacional Integral de Subproductos de Origen Animal no Destinados al Consumo Humano (SANDACH) que, entre otras novedades incluye medidas para asegurar la trazabilidad completa de los subproductos de origen animal desde su generación hasta su eliminación.

9. Actividades que pueden generar residuos potencialmente peligrosos

Por sectores industriales la Tabla 4.28 indica las actividades que suelen generar residuos especiales.

En la actualidad, de acuerdo con la IPPC, la instalación de la mayoría de las industrias que aparecen

Tabla 4.28. Actividades que suelen generar residuos

Agroalimentaria
Agricultura/Industria ganadera
Agricultura, gestión forestal: – Cultivos. – Labrado animal. – Gestión y explotación forestal. Productos animales y vegetales del sector de la alimentación: – Industria cárnica, charcuteria. – Industria láctea. – Industria de aceite y grasas vegetales. – Industria azucarera. Otros: – Industria de la bebida. – Destilación de alcohol y licores. – Fabricación de cerveza. – Manufactura de otras bebidas. Manufactura de alimentos para animales.
Energía
Energía
Industria del carbón. Producción y preparación de carbón o productos derivados del carbón: – Operaciones de coquización. Industria del petróleo: – Extracción de petróleo y gas natural. – Refinado del petróleo. – Almacenado del petróleo y productos derivados del refinado del gas natural. Producción de electricidad: – Centrales térmicas. – Centrales nucleares. – Otras centrales eléctricas. Producción de agua potable.
Química básica
Industria química primaria
Producción de productos químicos primarios y alimentarios: – Industria del cloro. – Industria de fertilizantes. – Otros productos primarios inorgánicos. – Industria del petróleo y del carbón. – Manufactura de materiales plásticos. – Otros productos primarios orgánicos.
Tratamiento químico; fabricación de sustancias básicas para la elaboración dedetergentes. Fabricación de productos farmacéuticos, biocidas. Otros procesos de manufactura y química fina.
Industria química
Industrias basadas en productos químicos básicos
Producción de tintas, barnices, pinturas y colas: – Producción de tintas. – Producción de pinturas. – Producción de barnices. – Producción de colas. Fabricación de productos fotográficos: – Producción de placas fotosensibles. – Fabricación de productos para procesos fotográficos. Industria del perfume: – Fabricación de jabón y detergentes. – Fabricación de productos de jabón. – Fabricación de productos detergentes. – Fabricación de perfumes. Acabados de goma y materiales plásticos: – Industria de la goma. – Industria de materiales plásticos. Fabricación de productos basados en asbestos. Producción de explosivos y similares . Fibras artificiales y sintéticas.
Metalurgia y Construcción de maquinaria
Metalurgia/Ingeniería mecánica y eléctrica
Extracción de menas metálicas. Metalurgia de hierro: – Producción de hierro. – Producción de materias primas de acero. – Transformación primaria del acero

Tabla 4.28. *(Continuación)*

Metalurgia no férrica:
- – Producción de alumina.
- – Metalurgia de aluminio.
- – Metalurgia de plomo y zinc.
- – Metalurgia de metales preciosos.
- – Metalurgia de metales no férricos.
- – Industria de ferroaleación.
- – Manufactura de electrodos.

Operaciones de fundición y moldeado:
- – Fundiciones de hierro.
- – Fundiciones de metales no férricos.
- – Moldeado (sin incluir maquinaria).

Construcciones mecánicas, eléctricas y electrónicas:
- – Maquinaria.
- – Tratamiento térmico. Tratamiento de superficies.
- – Aplicaciones de pintura.
- – Instalación eléctrica. Cables.
- – Producción de baterías y células secas.
- – Producción de alambre eléctrico y cables.
- – Producción de componentes electrónicos.

Materiales de construcción, cerámica y vidrio

Minerales no metálicos/Materiales de construcción/Cerámica/Vidrio

Minería y explotación de minerales no metálicos.
Materiales de construcción, cerámica y vidrio:
- – Producción de cal, cemento y yeso.
- – Fabricación de productos cerámicos.
- – Fabricación de productos que contengan asbestos/cementos.
- – Producción de otros productos de construcción.
- – Industria del vidrio.

Servicios comerciales

Servicios comerciales

Lavanderías, limpieza, tintorerías.
Transportes, automóviles y talleres:
- – Talleres de reparación.
- – Transportes.

Hoteles, cafés y restaurantes.

Servicios generales y varios

Servicios generales

Salud (hospitales, centros médicos, geriátricos, laboratorios).
Investigación (centros de investigación).
Domésticos, basuras.

Imprentas, publicidad, laboratorios fotográficos:
- – Imprentas, publicidad.
- – Laboratorios fotográficos.

Textil de piel y lana. Madera

Textil y pieles

Textil y manufacturas:
- – Peinaje y cardado de fibras textiles.
- – Estirado y torcido.
- – Blanqueo, tintorería, estampado y serigrafía.
- – Manufactura de textiles.

Industria de la piel y del cuero:
- – Tenerías.
- – Manufactura de pieles.
- – Fabricación de calzado y otros productos.

Industria del mueble y la madera:
- – Trituración y fabricación de paneles aglomerados.
- – Fabricación de muebles.

Papel y cartón

Papel/Cartón/Imprenta

Industria del papel y cartón:
- – Fabricación de pasta de papel.
- – Manufactura de papel y cartón.
- – Productos acabados de papel y cartón.

Gestión de residuos

Control de contaminación. Tratamiento de residuos

Limpieza y mantenimiento de vía pública.
Tratamiento de aguas residuales.
Tratamiento de residuos urbanos.
Tratamiento de residuos y efluentes industriales:
- – Incineración.
- – Tratamientos fisicoquímicos.
- – Tratamientos biológicos.
- – Recogida y/o tratamiento de residuos.
- – Disposición del residuo. Vertederos.

Recuperación y reciclaje

Recuperación y regeneración

Actividades de regeneración:
- – Regeneración de aceites.
- – Regeneración de disolventes.
- – Regeneración de resinas de intercambio iónico.

Actividades de recuperación y reciclaje.

en la tabla, están clasificadas por actividades y deben aportar una gran cantidad de estudios de impacto ambiental antes de que la administración competente les otorgue la licencia de explotación.

9.1. LOS ENVASES DE FITOSANITARIOS

La agricultura, como industria potencialmente contaminante, presenta uno de sus máximos exponentes en los fitosanitarios (pesticidas de uso agrario). La acción de éstos en el medio está muy cuestionada, desde el punto de vista ambiental, sin embargo este apartado hace referencia a los envases que los contienen que, obviamente se consideran residuos peligrosos.

En España, Sigfito Agroenvases SL, es una entidad sin ánimo de lucro que recogió en 2004, 1.073 toneladas de este tipo de envases y representa el 16% de los envases de fitosanitarios. Sigfito, una vez ha obtenido el preceptivo permiso de la autoridad competente establece un convenio con los agricultores e instala un recinto, con suelo impermeable, techado y bien protegido, donde los usuarios depositan los envases.

Sigfito es una empresa integrada en el SIG (Sistema Integrado de Gestión de envases) financiado

por los fabricantes de fitosanitarios. De momento no se admiten envases semivacíos o envases con productos caducados y, en 2005 tenia instalados 1.100 puntos de recogida.

9.2. NATURALEZA Y CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS SANITARIOS

Los residuos más significativos que se generan en los centros de atención médica se denominan residuos infecciosos por ser altamente peligrosos para la salud de las personas que los manejan directa o indirectamente, como médicos, enfermeras, auxiliares, personal de mantenimiento, servicios de atención al público y trabajadores de la salud en general.

Científicamente está demostrado que la cantidad de residuos que cualitativamente pueden considerarse peligrosos representa una pequeña proporción de los que se producen en los establecimientos sanitarios. Por término general se puede establecer un total de 3 kg por día y cama y, dentro de ellos:

- El 50% son residuos asimilables a urbanos.
- 40% Residuos clínicos no infecciosos.
- 10% Residuos clínicos infecciosos.

Sin embargo, el riesgo potencial, tanto para el colectivo de profesionales sanitarios, como para los ciudadanos en general, es lo suficientemente importante como para que desde las instituciones y desde los propios profesionales, se tomen todas las medidas necesarias para garantizar los procesos de gestión más adecuados en cada caso.

Para que ocurra infección debe haber:

- Presencia de un agente infeccioso en el residuo.
- Concentración suficiente del agente infeccioso como para tener capacidad infectiva.
- Presencia de un huésped susceptible de ser infectado.
- Presencia de una puerta de entrada para el acceso del germen huésped.

En las diferentes áreas de hospitales, centros de atención básica, ambulatorios y demás centros de atención médica, los residuos sólidos están conformados por los siguientes componentes:

- Cartón, papel y plástico proveniente de empaques de medicamentos.
- Elementos abandonados en los pasillos y habitaciones por los visitantes como cartón, residuos de comida y papel. Materiales usados en curaciones como gasas, algodón, suturas.
- Jeringas, agujas, bisturís, cuchillas y agujas de sutura.
- Elementos de tela impregnados de sangre, vómitos y otros líquidos corporales.
- Pedazos de manguera y/o tubos utilizados para transfusión de sangre.
- Residuos de salas de cirugías, curaciones, tejidos y partes de órganos, entre otros.

9.2.1. Identificación de los residuos sanitarios por áreas

Por áreas funcionales de servicios sanitarios los residuos se identifican conforme indica la Tabla 4.29.

Con todos estos residuos, se debe tener especial cuidado en su manejo y almacenamiento, especialmente con aquellos que se originan en el tratamiento de pacientes, como los de salas de cura, cirugía, consultorios médicos, odontológicos, salas de transfusión, bancos de sangre, urgencias, laboratorios, partos, vacunación, rayos X y diálisis por ser transmisores potenciales de enfermedades de alto riesgo para la salud de las personas.

9.2.2. Clasificación de los residuos sanitarios

Hay una variada clasificación de los residuos sanitarios en función del organismo clasificador, entre las más importantes se pueden citar:

- Organización Mundial de la Salud: residuos generales, patológicos, radioactivos, químicos, infecciosos, punzocortantes, farmacéuticos.
- Alemania: residuos generales, patológicos, radioactivos, químicos, infecciosos, punzocortantes, farmacéuticos.
- Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA): cultivos y muestras almacenadas, residuos patológicos, residuos de sangre humana y productos derivados, residuos punzocortantes, residuos animales, residuos de aislamiento, residuos punzocortantes no usados.
- Española, indicada seguidamente.

Los residuos generados por las actividades sanitarias se clasifican de acuerdo con los grupos establecidos en la Tabla 4.30.

9.2.3. Grupos de servicio con problemática ambiental homogénea

La Tabla 4.31 expone, por grupos homogéneos, la generación de residuos en las diversas unidades de

Tabla 4.29. Tipos de residuos sanitarios por áreas

Áreas	TIPO DE RESIDUOS SANITARIOS				
	Anátomo/Patológicos	Biomédicos	Corto punzantes	Tóxicos especiales	Comunes
SERVICIOS CLÍNICOS					
MÉDICO	X	X	X		X
QUIRÚRGICO	X	X	X		X
QUIRÓFANO	X	X	X		X
CUIDADOS INTENSIVOS	X	X	X		X
SALAS DE AISLAMIENTOS	X	X	X		X
UNIDAD DE DIÁLISIS	X	X	X		X
UNIDAD DE ONCOLOGÍA	X	X	X		X
URGENCIAS	X	X	X		X
CONSULTAS EXTERNAS	X	X	X		X
SALA DE AUTOPSIAS	X	X	X		X
RADIOLOGÍA	X	X	X		X
LABORATORIOS					
HEMATOLOGÍA	X	X	X	X	X
MICROBIOLOGÍA	X	X	X	X	X
INVESTIGACIÓN	X	X	X	X	X
PATOLOGÍA	X	X	X	X	X
BIOQUÍMICA	X	X	X	X	X
MEDICINA NUCLEAR	X	X	X	X	X
SERVICIOS AUXILIARES					
BANCO DE SANGRE	X	X	X		X
FARMACIA		X			
CENTRAL DE SUMINISTROS					X
LAVANDERÍA		X			
COCINAS					X
INCINERACIÓN	X	X	X		X
ÁREAS PÚBLICAS					X

Tabla 4.30. Clasificación de los residuos sanitarios

GRUPO I	Asimilables a urbanos, pero generados en estos centros: comedores, oficinas, jardinería, etc.
GRUPO II	Residuos cuya manipulación solo puede representar un riesgo dentro del propio centro: material de curas, vendas, yesos, ropa de pacientes no infecciosos, etc.
GRUPO III	En este grupo se agrupan los residuos de riesgo para la salud laboral y pública: – Sangre y hemoderivados. – Cortopunzantes – Vacunas vivas o atenuadas. – Residuos infecciosos.
GRUPO IV	Residuos que precisan una gestión especial en todas sus etapas: – Residuos anatómicos y citostáticos. – Resto sustancias químicas. – Medicamentos caducados. – Residuos radioactivos. – Residuos laboratorios biológicos, etc.

Tabla 4.31. Servicios sanitarios con problemática de residuos

GRUPO I	– Todas la unidades de hospitalización.
GRUPO II	– Consultas externas. – Esterilización. – Rehabilitación. – Radiodiagnóstico.
GRUPO III	– Urgencias. – Bloques quirúrgicos. – Anestesia. – Unidades de cuidados intensivos.
GRUPO IV	– Bioquímica. – Microbiología. – Hematología. – Anatomía patológica.
UNIDADES ESPECIALES	– Banco de sangre. – Nefrología. – Medicina nuclear. – Farmacia. – Oncología.

los centros sanitarios, atendiendo a la clasificación establecida por la legislación española.

9.2.4. Cuantificación de la generación de residuos por tipos

En España y por término medio, la distribución en la generación de los residuos por actividades sanitarias, y en función de la clasificación que se realiza en este país, es la que muestra la Tabla 4.32:

Tabla 4.32. Cuantificación de los residuos sanitarios

Clasificación	Tipología	%
I	Residuos asimilables a municipales	50
II	Residuos no específicos	45
III	Residuos específicos o de riesgo	
IV	Residuos tipificados en normativas singulares: – Citostáticos – Químicos – Radioactivos	5

9.2.5. Sistemas de tratamiento para los residuos sanitarios

Para el tratamiento de los residuos sanitarios existen diversas tecnologías, de las cuales sólo algunas de ellas son intercambiables:

- *Incineración.* Generalmente en la versión denominada pirolítica que consiste en una primera etapa (horno propiamente dicho), seguida de una cámara de oxidación y de postcombustión, donde los gases deben alcanzar los 1.200 ℃, durante un tiempo de dos segundos. Se trata del sistema más seguro para este tipo de residuos. La etapa de limpieza de gases es fundamental.
- *Desinfección con vapor.* Para ello se emplea un autoclave, donde se inyecta vapor a 110 ℃-1.660 ℃, a una presión de 100-500 kPa durante 30-90 minutos. Es útil para la desinfección de residuos inorgánicos y metálicos. Por lo general, seguidamente los residuos se trituran y se envían a vertedero.
- *Desinfección por microondas.* Se trata de un proceso mucho más efectivo que el anterior cuando existe materia orgánica. La condición indispensable es que el residuo esté húmedo. Para potenciar la desinfección el residuo es volteado constantemente.
- *Desinfección química*. Es el sistema más eficiente para el tratamiento de líquidos: sangre, orina, heces y fangos. Es un proceso aplicable al tratamiento de patógenos. Los reactivos suelen ser aldehídos, compuestos clorados o fenólicos.

10. Residuos y tecnologías aplicables para su reciclaje

La Tabla 4.33 expone un breve resumen, según la tipología del residuo, diferenciando los contaminantes principales de naturaleza orgánica o inorgánica, así como las tecnologías más recomendables para su aprovechamiento.

Lógicamente la lista, tanto de residuos como de tecnologías seria interminable pero, en este apartado sólo se pretenden incluir aquéllas que permitan una recuperación de las partes aprovechables en orden a su inertización y reciclado, o bien aquéllas

Tabla 4.33. Tipo de tratamiento recomendado según la tipología del residuo

Residuos con contaminantes básicamente orgánicos	
Tipo de residuo	**Tecnología aplicable**
Líquidos con disolventes orgánicos.	– Destilación. – Recuperación energética. – Decantación.
Líquidos con productos petrolíferos.	– Destilación. – Recuperación energética. – Decantación.
Fangos orgánicos.	– Recuperación energética. – Decantación. – Extracción de disolvente. – Ceramización.
Terrenos contaminados con COV's.	– Evaporación. – Vitrificación.
Cajas de baterías con plomo.	– Recuperación energética. – Reciclado y reutilización.
Neumáticos y productos de goma.	– Recuperación energética. – Reciclado y reutilización. – Procesos térmicos.
Instrumentos en desuso.	– Destilación. – Recuperación energética.
Polímeros sólidos.	– Recuperación energética. – Reciclado y reutilización. – Procesos térmicos. – Ceramización.
Pinturas y residuos de pinturas.	– Recuperación energética. – Procesos térmicos. – Ceramización.
Plástico, textil y papel mezclados *(fluff)*.	– Recuperación energética. – Procesos térmicos.

Tabla 4.33. *(Continuación)*

Residuos con contaminantes básicamente inorgánicos	
Tipo de residuo	**Tecnología aplicable**
Líquidos con bajas concentraciones de metales.	– Precipitación química. – Intercambio iónico. – Ultrafiltración. – Evaporación.
Líquidos con altas concentraciones de metales.	– Precipitación química. – Intercambio iónico. – Evaporación.
Lodos y suelos con baja concentración de metales.	– Lixiviación química. – Vitrificación. – Ceramización.
Lodos y suelos con alta concentración de metales.	– Lixiviación química. – Vitrificación. – Procesos metalúrgicos. – Ceramización.
Escorias, óxidos y silicatos con Zn, Cd y Pb.	– Lixiviación química. – Procesos metalúrgicos. – Ceramización.
Cenizas y polvo con metales.	– Vitrificación. – Procesos metalúrgicos. – Reciclado y reutilización. – Ceramización.
Arena de fundición.	– Reciclado y reutilización. – Vitrificación. – Ceramización.
Escorias de procesos térmicos.	– Lixiviación química. – Procesos metalúrgicos. – Reciclado y reutilización. – Ceramización.
Ácidos procedentes de baterías de plomo.	– Lixiviación química. – Procesos metalúrgicos.
Baterías de Ni/Cd.	– Lixiviación química. – Procesos metalúrgicos.
Mercurio metálico.	– Destilación.

que consiguen una inertización y, sin recuperar constituyentes contaminantes, los transforman en materiales de construcción (como el proceso de ceramización).

En diversos capítulos de esta obra se incide con detalle en la aplicación de una determinada tecnología para la valorización de familias de residuos clasificados precisamente bajo esta denominación: orgánicos, o sinónimo de degradable o ligero e inorgánico.

11. Concentración del contaminante y recuperación

El diagrama de Sherwood, ilustrado en la Figura 4.21 indica cómo el precio de un recurso, metal, vitamina, elemento, etc., crece a medida que disminuye la concentración existente en la naturaleza. Así, los recursos poco concentrados tendrán un precio de extracción alto. Utilizando este diagrama se puede calcular cuál es la concentración a la que se puede recuperar un material comparando:

- Precios de los materiales.
- Concentración mínima a la que es rentable la recuperación.

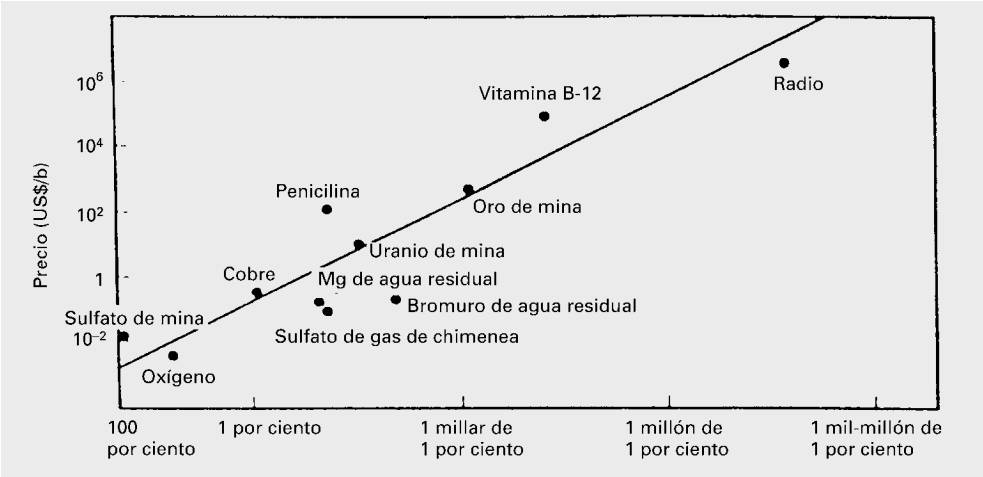


Figura 4.21. Diagrama de Sherwood.

- Datos estadísticos de la concentración de metales en las corrientes de residuos.

La Tabla 4.34 expone la consecuencia del empleo del diagrama de Sherwood y muestra cuáles son los metales infrautilizados. Las razones para tan baja efectividad son que sólo se recuperan los metales que se hallan en grandes concentraciones y que pocos recuperadores trabajan en la valorización de estos metales.

La representación del diagrama de Sherwood de la Figura 4.22 intenta explicar la baja eficiencia de la recuperación de los metales a base de reproducirlos en un gráfico en el que en el eje de ordenadas se halla el precio de mercado del metal y en las abscisas la concentración habitual en las corrientes residuales.

Los puntos del diagrama indican el precio del metal (en 1986) respecto a la concentración a la que se recupera sólo el 10%. Se considera que para que una recuperación sea económicamente rentable la tasa de recuperación ha de ser, como mínimo, del 10%. La Figura 4.22 muestra esto junto con el precio del metal en 1986 (las cifras de concentración corresponden al mismo año). La línea diagonal se denomina *línea de Sherwood* y se utiliza en minería para conocer la viabilidad de la extracción de un metal a partir de su mena. O bien el coste de extracción de un metal a partir de su concentración en la mena.

Los puntos situados por encima de la línea de Sherwood indican que los metales contenidos en las corrientes de residuos sólo son recuperados cuando se hallan en concentraciones muy altas. De donde se desprende que algunos residuos contienen una mayor

Tabla 4.34. Porcentaje de metal recuperado

Metal	Mínima concentración para la recuperación (Sherwood)	Metal teóricamente recuperable (%)	Metal recuperado en 1987 (%)
Antimonio (Sb)	0,00405	74-87	32
Arsénico (As)	0,00015	98-99	3
Bario (Ba)	0,0015	95-98	4
Berilio (Be)	0,012	54-84	31
Cadmio (Cd)	0,0048	82-97	7
Cromo (Cr)	0,0012	68-89	8
Cobre (Cu)	0,0022	85-92	10
Plomo (Pb)	0,074	84-95	56
Mercurio (Hg)	0,00012	99	41
Níquel (Ni)	0,0066	100	0,1
Selenio (Se)	0,0002	93-95	16
Plata (Ag)	0,000035	99-100	1
Zinc (Zn)	0,0012	96-98	13

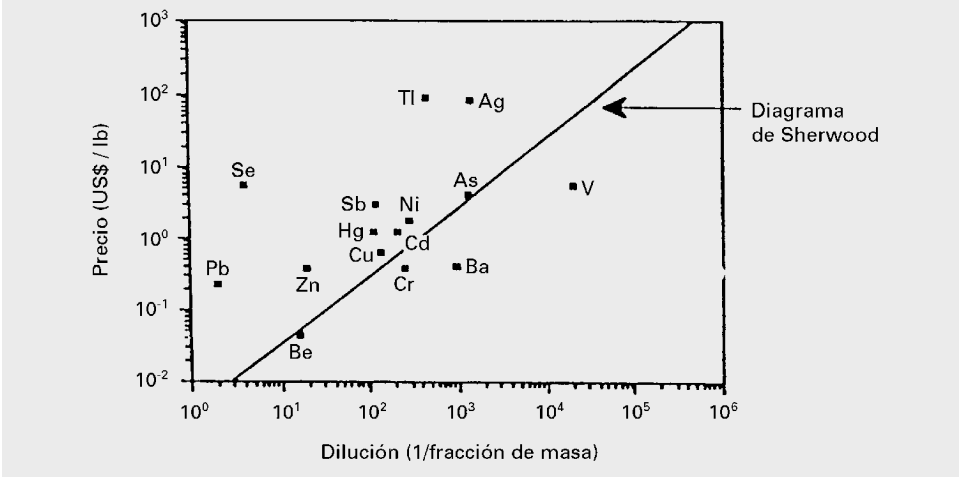


Figura 4.22. Precio de la recuperación vs Dilución.

cantidad de metal que las minas vírgenes de donde proceden. Resumiendo, se podría indicar que los puntos trazados sobre la línea indican que el metal se recupera sólo cuando se encuentra en concentraciones muy elevadas, despreciando todo el margen de concentración de la derecha en que todavía seria rentable su recuperación. Si se dispusiera de datos más actualizados, de bien seguro que la columna de metal recuperado (Tabla 4.34) habría aumentado de manera considerable.

12. Reciclaje directo e indirecto

Aunque se trata tan sólo de una denominación con finalidades didácticas, vale la pena distinguir entre el reciclaje directo y el indirecto.

El reciclaje directo es el que tiene lugar cuando el residuo puede ser recuperado y reutilizado directamente. El caso más popular sería la oferta de bidones o material de embalaje para ser reaprovechado por otro consumidor para el mismo uso. En las bolsas de subproductos abundan los residuos de esta tipología. Así, una industria ofrece ácido usado que puede ser usado por otra industria para un desengrase primario.

Otra variante es el uso de un residuo como materia prima para un proceso. Así por ejemplo, las arenas usadas de fundición se pueden emplear directamente en la fabricación de clínquer. En resumen, el reciclaje directo consiste en la reutilización de residuos sin actuar, al menos de manera importante, sobre ellos. A esta tipología de residuos se les suele llamar subproductos. (Si bien desde el punto de vista oficial ha de ser la Administración quien autorice el cambio de denominación: »residuo/subproducto«).

El reciclaje indirecto es el que tiene lugar cuando para aprovechar, total o parcialmente, el residuo éste debe someterse a un proceso industrial importante. Ejemplos típicos son la recogida de vidrio que vuelve a transformarse en vidrio en la vidriera (después de un proceso de selección) o el del papel; igualmente, la fracción orgánica de las basuras domésticas se puede transformar en abono (compost). Todas estas operaciones requieren una profunda transformación, que recibe el nombre de valorización y ello representa un primer paso hacia la denominada ecoindustria. Los capítulos siguientes de esta obra están dedicados a la valorización de residuos para su transformación en materiales de construcción.

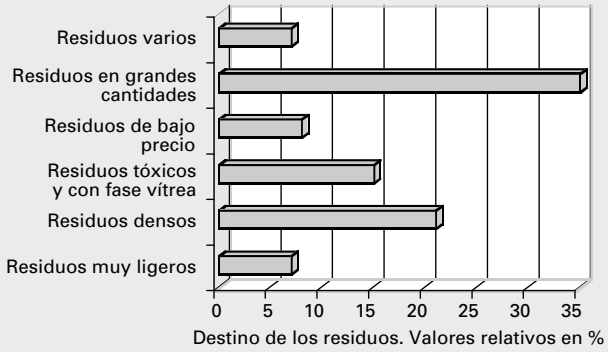
13. Reciclaje multidisciplinar

El término reciclaje multidisciplinar se refiere al empleo de tecnologías comunes y diversas para la valorización de una lista interminable de residuos. Hay que insistir, una vez más, que la filosofía que impregna esta obra es la valorización, es decir usar una o varias de las tecnologías citadas en el Capítulo 3 para convertir los residuos peligrosos en un inofensivo material.

Por todo lo expuesto en este capítulo es obvio que se deben comenzar a reciclar residuos para la fabricación de materiales para la construcción comenzando por aquéllos más conflictivos y/o tóxicos. El histograma de la Figura 4.23 agrupa los residuos de acuerdo con el destino que se les pretende dar cuando vayan a ser reciclados en orden a su conversión en materiales de construcción. Las cantidades están representadas en valores relativos. Los más abundantes corresponden a los residuos de la minería y grandes obras públicas así como los denominados residuos densos que proceden de plantas de tratamiento o industria de base.

La tabla de la Figura 4.23 recoge la síntesis de lo que será el desarrollo de los sucesivos capítulos. Así, usando principalmente las tecnologías de ceramización y vitrificación, a la izquierda se indica la característica más sobresaliente del residuo. Por ejemplo, los residuos muy ligeros suelen ser orgánicos y con toxicidad limitada; se reciclan cerámicamente para la fabricación de materiales de construcción ligeros (aislantes). En caso de estar muy limpios se pueden metanizar, etc.

Muchos de los ejemplos que aparecen en la tabla anterior se hallan extensamente desarrollados en los capítulos posteriores de esta obra.



Tipología del residuo	Aplicación	Ejemplos
Residuos muy ligeros, básicamente orgánicos.	Materiales aislantes.	Espuma de poliuretano. R. biodegradables. Biomasa. Fangos de depuradora y papeleros. Yeso (sólo o con Á. Fosofórico). Residuos orgánicos. Lodos de depurar aceites usados.
Residuos densos, básicamente inorgánicos.	Cerámica densa.	Lodos rojos. Escorias metalúrgicas. Asbestos. Lodos galvánicos. Escorias de RSU.
Residuos tóxicos y con fase vitrea.	Vitrificaciones.	Residuos químicos. Cenizas volantes. Polvos de acería. Escorias de magnesio. Estériles de rocas Vidrio micronizado.
Residuos de bajo precio.	Graneles.	Áridos y arcillas para rellenos. Derribos de edificios y pavimentos. Arenas recuperadas. Escorias incineradas.
Residuos en grandes cantidades.	Grandes obras públicas.	Estériles de minas. Obras públicas. Estériles de canteras.
Residuos varios.	Aplicaciones especiales.	Plásticos. Composites. Baterías. Neumáticos. Catalizadores. Fluorescentes. Frigoríficos. Automóviles. Chatarra electrónica.

Figura 4.23. Tipo de residuo y aplicación recomendable.

14. Reciclaje de materiales en Europa

Resultaría casi imposible listar la tasa de residuos que se reciclan. En primer lugar por falta de estadísticas fiables y, en el caso de existir, por las diferencias de criterio que existen a la hora de clasificar un residuo. Con el ánimo de que sirva de ejemplo, los gráficos siguientes recogen las cifras de reciclaje de productos similares en varios países. En alguno de ellos, el papel se considera un residuo industrial mientras que en otros al existir contenedores de recogida selectiva en las poblaciones, se les cataloga como residuos domésticos. Ello explica las discrepancias que el lector pueda observar entre estos datos y los aportados por otras fuentes de información, en particular las estadísticas aparecidas en el Capítulo 11.

La Figura 4.24 muestra el índice de reutilización de papel en la Europa de los 15, donde se observa

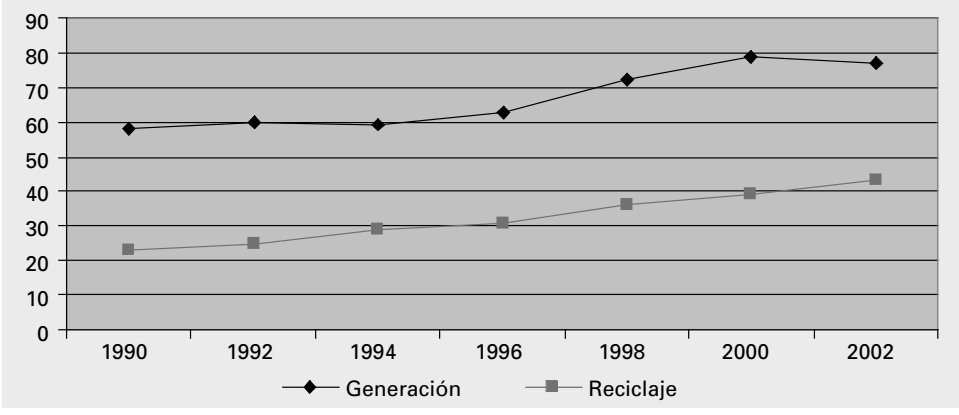


Figura 4.24. Generación y recuperación y reciclaje de papel en la UE-15 (millones de toneladas).

que la diferencia entre la cifra de generación y la de recogida para el reciclaje se mantiene sensiblemente estable desde el 1990 a 2002, si bien la tendencia apunta a un incremento sostenido de la tasa de recogida.

En la lectura de estas cifras debe señalarse que existe un importante transporte de papel recuperado entre los diversos estados, lo que supone variaciones importantes entre su uso como materia prima y las cifras de recogida de papel en algunos estados.

También debe señalarse que el uso de una materia prima más sucia supone la necesidad de eliminar esta contaminación, lo cual significa un aumento de polución y consecuentemente de las medidas correctoras.

La Figura 4.25, correspondiente al año 2000 (según fuente de Euroestar) reproduce, en porcentaje la tasa de reciclado de papel, vidrio, plásticos y metales en países muy dispares de Europa. En la Figura 4.25 la nomenclatura es la siguiente:

- P (Papel),
- V (Vidrio)
- PL (Plástico
- M (Metal)

Por países:

- Dinamarca (Dk)
- Alemania (Al)
- Grecia (Gr).

Como se observa, las diferencias son muy importantes de un país a otro. Con la introducción del punto verde, la tendencia muestra una convergencia de resultados en la mayoría de los países.

Excepto el vidrio, que alcanza cotas muy altas de reciclaje en la mayoría de los países de la UE, hay que reconocer que los porcentajes de recuperación son muy reducidos. En la Figura 4.26 se muestra la

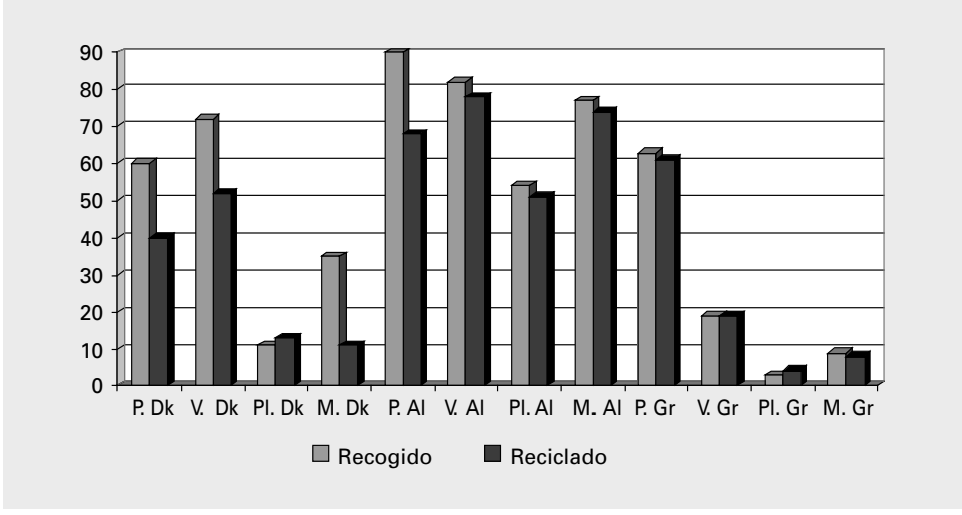


Figura 4.25. Recogida (recuperación) vs reciclaje en algunos países de Europa.

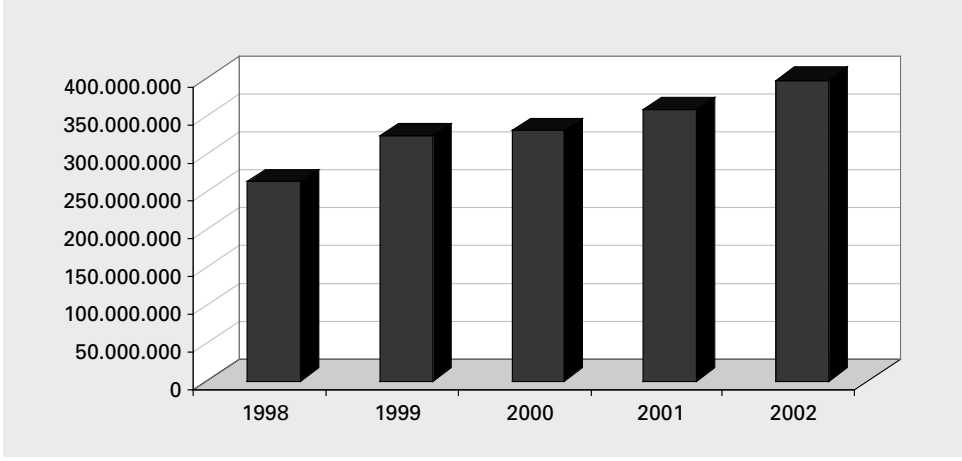


Figura 4.26. Vidrio reciclado en España.

cantidad de vidrio reciclado en España desde 1998 hasta 2002:

- 1998: 263.000 toneladas.
- 1999: 324.000 toneladas.
- 2000: 330.000 toneladas.
- 2001: 358.000 toneladas.
- 2002: 398.000 toneladas.

La cifra, como se ve, ha aumentado mucho, pero la población y el consumo también, por lo que la recuperación final arroja una tasa de recuperación de 25 kg/habitante y día, valores muy alejados de la mayoría de los países de la UE.

En el punto 4 del DVD adjunto se muestra la evolución del reciclaje de residuos en Francia del 1993 a 2003.

14.1. VALORIZACIÓN DE RESIDUOS INDUSTRIALES DE GRAN PRODUCCIÓN

Con independencia de lo que se analizará en los capítulos posteriores destinados a la valorización, en el presente apartado se quiere hacer una incursión a las tendencias en la valorización de algunos residuos que se generan en grandes cantidades:

- *Materiales bituminosos procedentes de demolición.* En los Países Bajos el reciclado de estos residuos para su incorporación a las mezclas bituminosas está regulado por ley y alentado por las autoridades. El sistema más extendido es el reciclado en caliente, pero también se utiliza la adición de granulados a la construcción de bases de carreteras y en forma de material para capas de estabilización, mezclado con arena y cemento. Sólo en el citado país se estima que en el año 1989 se usaron más de 1,5 millones de toneladas de este residuo para la construcción de carreteras. De esta cantidad un tercio fue reciclado en caliente.
- *Escorias de plantas de incineración de RSU.* La gran variedad de residuos que aparecen en los RSU, su carácter incontrolable y el diseño de las actuales parrillas de los hornos de las incineradoras de RSU ha llevado a las autoridades a ser cautas con la clasificación de este residuo y, en consecuencia, con sus posibilidades de valorización. Las aplicaciones más frecuentes, por su carácter conservador, son las mezclas de las escorias en masas de hormigón para fabricar hormigones en masa. Las aplicaciones a granel deben realizarse en aquellos proyectos donde no haya posibilidad de contaminación de los lixiviados generados, o bien estos se controlen perfectamente. Su aplicación en materiales cerámicos, como materia prima, ha dado unos excelentes resultados.
- *Cenizas volantes de centrales termoeléctricas.* En muchos países, España entre ellos, la generación de energía eléctrica a partir de carbón es importante y representa una parte muy considerable de la producción (en España, dependiendo de la demanda y la pluviometría, más del 25% de la electricidad generada emplea carbón como fuente de producción). La mayor parte de las cenizas volantes se destina a la industria del cemento. Otra parte se utiliza como relleno en la formulación de hormigones. En los países carentes de gravas naturales una parte se emplea en la fabricación de agregados en substitución de gravas. Las mejores calidades de combustión del carbón conseguida en los últimos tiempos, como consecuencia de las restricciones en los valores de emisión de gases a la atmósfera, han conducido a una alteración de la caracterización de las cenizas y ha permitido iniciar estudios de empleo a granel en unas condiciones semejantes a la de las escorias de incineradoras.
- *Escorias de altos hornos.* Tradicionalmente la escoria de alto horno se ha usado en la industria del cemento para la producción de clínquer. En su forma granular, y debido a sus propiedades hidráulicas, se emplea como ligante en la construcción de carreteras y grandes obras civiles. Desde el punto de vista técnico ciertas aplicaciones se hallan condicionadas al hecho de que este residuo contiene cal libre.

15. Eficiencia recicladora en España a partir de RSU

En el caso de los RSU, que se analiza con detalle en el Capítulo 11 de esta obra, la eficiencia de la recuperación es muy problemática cuando el RSU llega a la planta de tratamiento sin separación previa. Hay una serie de residuos cuya recuperación es inviable a partir del momento en que ha entrado en contacto con otros contaminantes, como es el caso del papel. Para paliar este problema se ha ido implantando la recogida selectiva. La Figura 4.27 muestra la eficacia recicladora en España en el año 2005, en las partidas que, naturalmente existe recogida selectiva.

La partida más importante la constituye el papel y cartón con un porcentaje que se acerca al 70% (Sin embargo la Asociación Española de Recuperadores de Papel y Cartón, denunció que, en 2003, España había tenido que importar 900.000 toneladas de papel usado). Conviene destacar que para que sea posible la reutilización de papel es preciso que éste no haya estado en contacto con la fracción orgánica del RSU, de ahí la necesidad imperiosa de la recogida selectiva. Con todo, antes de entregarlo a la papelera es preciso separar las diversas categorías de papeles. La mayoría de las fracciones a recuperar se hallan al albur de las grandes oscilaciones de los precios del mercado y el papel en especial (En este sentido y a partir de 2002, la China ha desequilibrado el mercado tradicional internacional debido a su gran demanda). Por ello es fácil ver grandes oscilaciones en la tasa de recogida de un año a otro.

Le sigue en importancia el vidrio. Éste, tanto si se separa en la planta de triaje como si procede directamente de la recogida selectiva (contenedor que se encuentra en las calles) debe separarse por colores (transparente, verde y ámbar) antes de trasladarlo a la vidriera. Según fuentes de ECOVIDRIO, en 2004 cada ciudadano español recicló, de media, 10 kg de vidrio al año.

Los demás componentes se aprovechan ya que su precio de mercado es alto: chatarras metálicas la Asociación de Latas de Bebidas dice que, en 2005, los españoles reciclaron 2 de cada 3 latas consumidas), tejidos y gomas. En el Capítulo 11 de esta obra aparecen numerosas estadísticas de reciclaje y recuperación de fracciones residuales.

15.1. MODELOS DE GESTIÓN DE RSU

Un observador inquieto sobre los modelos de gestión de los residuos domésticos que haya visitado diversas ciudades puede llegar a la conclusión de que existen tantos modelos de gestión como ciudades haya visto. Los factores que condicionan el modelo de gestión serían muy extensos pero vale la pena mencionar algunos:

- Densidad de población.
- Tamaño de la ciudad.
- Sensibilidad ambiental del ciudadano.
- Potenciación del transporte público y tráfico en general.
- Potencial económico del municipio.
- Situación geográfica de la ciudad.

Sin embargo, desde el punto de vista eminentemente técnico, se puede hablar de dos grandes modelos que, de una manera u otra se hallan condicionados por el listado de parámetros antes mencionados. Es

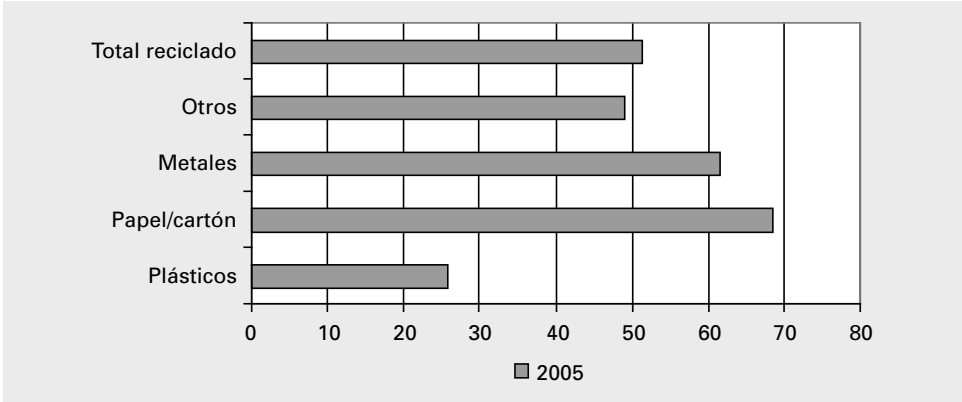


Figura 4.27. Eficacia recicladora en España.

por ello que es raro encontrar un modelo que se ciña estrictamente a un estándar y lo normal es una mezcla que engloba, en mayor o menor grado, ingredientes de uno u otro modelo. En grandes líneas se puede hablar de dos grandes modelos:

- *Gestión en masa.* No existe ninguna clase de recogida selectiva. En este escenario la tasa de reciclaje va a ser baja. En la práctica el destino de los residuos será el vertedero o bien una compleja planta de triaje/incineración, con resultados muy precarios.
- *Gestión integrada.* Incorpora diferentes niveles de recogida selectiva, con lo cual la tasa de recuperación puede llegar a ser muy elevada.

La Tabla 4.35 propone una comparación de ambos sistemas. Si bien parece claro que el modelo que debería seguirse es el de la gestión integrada, este también encuentra ciertas barreras:

- Existe la opinión de que no hay mercados rentables para los materiales reciclados.
- La gran inercia de los sistemas actuales de gestión, o sea el uso de soluciones simples y estables.
- Poca concienciación de los ciudadanos para calibrar las ventajas de los sistemas integrados. A nivel técnico el escaso desarrollo de los análisis del ciclo de vida impide una toma de decisiones más rápida.
- Falta de infraestructura para agilizar los mercados de los materiales recuperados.

Hay que indicar que el Capítulo 11 de esta obra se dedica íntegramente a los diversos modelos de gestión, tratamiento y valorización de los RSU.

Para concluir, se cita el ejemplo del gobierno danés en su programa ambiental 2005-2008 y en referencia a los RSU se ha propuesto las siguientes metas:

- 65% de recuperación y reciclaje.
- 26% de incineración.
- 8% a depósito controlado.

15.2. RESIDUOS TÓXICOS CONTENIDOS EN LOS RSU

Los residuos sólidos urbanos contienen una cierta cantidad de residuos peligrosos denominados *tóxicos del hogar*. Son residuos generados en los hogares y comercios y que, normalmente, no son objeto de recogida especial. Un detallado estudio suizo denota que la cantidad de residuos tóxicos presentes en un hogar medio puede alcanzar la cifra de 150 tipos de sustancias, todos ellas clasificadas como residuos especiales.

Dada la peligrosidad de estas sustancias y la facilidad que tienen de contaminar grandes áreas debido a su escaso control, las autoridades llevan a cabo una gran cantidad de campañas de sensibilización para que estos residuos no se arrojen a los RSU. El destino recomendado es el «punto verde o punto limpio». La cantidad generada es diversa, pero suele ser, como mínimo, de 5 kg/persona y año. Las fuentes más habituales están sintetizadas en la Tabla 4.36.

Tabla 4.35. Comparación entre los dos posibles modelos de gestión

Gestión en masa	Gestión integrada
Basa toda la gestión en la incineración o el vertido. El municipio suele concentrar toda la responsabilidad.	Tiende al óptimo ambiental, económico y social. Apela a la prevención y a la colaboración de todos los ciudadanos.
No existe motivación para la prevención y minimización.	La minimización es prioritaria, y se impulsan diversas formas de valorización, como el reciclaje y el compostaje
Sólo requiere la optimización técnico/económica de las concesiones, y facilitar una logística de recogida eficiente.	Suele ser un modelo difícil de gestionar, habida cuenta de las partes que intervienen. Su coste es elevado.
El objetivo es recoger todos los RSU de forma ambientalmente correcta y con el mínimo coste.	Exige objetivos difíciles de cuantificar debido a la gran cantidad de acciones involucradas.
Básicamente persigue un perfeccionamiento del modelo existente. No obstante, las nuevas directrices de la UE apuntan hacia modelos integrados.	Incorpora sistemas y tecnologías avanzadas. Tiene en cuenta las particularidades de la región o municipio, así como las necesidades estratégicas de los sectores industriales locales.
Esencialmente se financia a través de tasas.	Permite un mejor aprovechamiento de las fuentes de financiación externas.
Presenta una gran dependencia de las tecnologías extranjeras.	Tiende a sustituir las inversiones masivas en capital por inversiones en mano de obra local.
Tiene una fuerte oposición social.	Facilita la aceptación pública de nuevas instalaciones de tratamiento.

Tabla 4.36. Comparación entre los dos posibles modelos de gestión

Cocinas	Baños	Bricolaje	Garaje	Jardín
Productos de limpieza	Productos de limpieza	Pinturas	Anticongelante	Abonos
Ceras	Desinfectantes	Disolventes	Aceites	Herbicidas
Aerosoles	Medicamentos	Fluorescentes	Combustible	Raticidas
Insecticidas	Cosméticos	Pilas	Batería	Insecticidas

En el País Vasco (España) se realizó una campaña de sensibilización y recogida que sirvió de prueba piloto. La respuesta ciudadana resultó muy satisfactoria y el resultado de la diversidad de los residuos recolectados fue el indicado en la Tabla 4.37.

También en el Capítulo 11 de esta obra se ofrece una amplia información sobre todo ello.

Tabla 4.37. Porcentaje de residuos tóxicos sólidos y líquidos hallados en los RSU

Residuos sólidos	%	Residuos líquidos	%
Productos de limpieza	5,0	Aceites usados	1,1
Radiografías	4,2	Productos químicos	0,6
Fitosanitarios y pesticidas	1,1	Disolventes usados	2,3
Aerosoles y sprays	2,8	Aceites de motor	7,5
Envases de aceites usados	0,2	Aceites domésticos	2,1
Ceras y colas	4,8	Gasolinas	2,0
Pilas	12,7		0,1
Medicamentos	4,7		
Pinturas y barnices	20,2		
Baterías	16,4		
Varios	12,2		
Total	84,3	Total	15,7

15.3. LOS RESIDUOS INDUSTRIALES

Con los residuos denominados industriales, el funcionamiento es muy diferente en relación a los domésticos. Por lo general las industrias generan una tipología de residuos bien repetitiva lo que facilita su gestión y, por tanto su valorización.

Por lo que hace referencia a Cataluña y según datos oficiales emitidos por la Agencia de Residuos de Cataluña (Gobierno Autónomo), los resultados, en porcentaje, aparecen en la Figura 4.28.

Como muestra la figura, correspondiente a cifras del 2004, el 64% de los residuos se valorizaron, mientras que un 35% fueron al vertedero. La política de un gobierno que se precie de ambientalista es lograr que el porcentaje de residuos que terminen en el vertedero sea cero, si bien esto, en el campo de los residuos industriales es casi utópico.

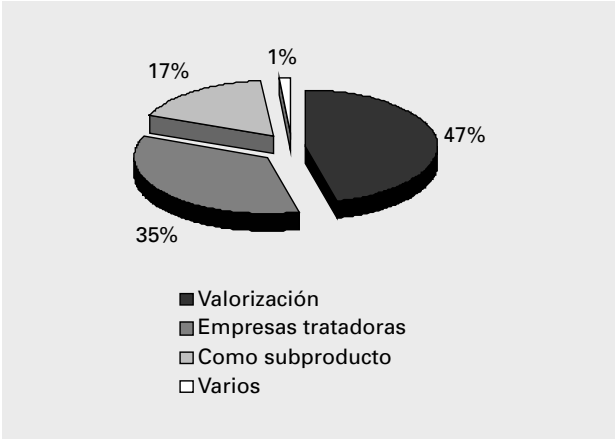


Figura 4.28. Destino de los residuos industriales en Cataluña.

15.3.1. El sector del envase y el embalaje

Sabido es que buena parte del incremento de la generación de residuos se debe al aumento del número de envases y, sobre todo, embalajes. Con motivo de la celebración de la feria Ispack, se ha presentado la tercera edición del *Libro Blanco del Envase y Embalaje en España*, donde, en 2006, el sector se muestra en plena expansión, debido a la demanda interna y las exportaciones.

La Figura 4.29 muestra la importancia de cada sector en la necesidad de envases y embalajes.

El informe concluye que existen 1.650 empresas en el sector del envase y embalaje en las que trabajan 55.000 personas.

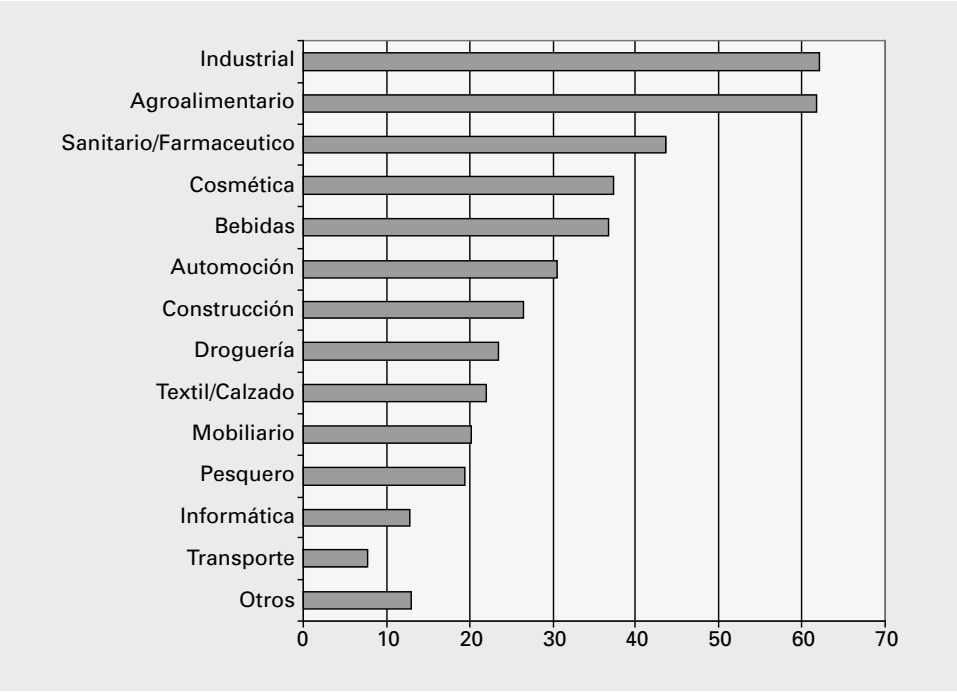


Figura 4.29. Porcentajes de empresas dedicadas a cada sector.

16. Los suelos contaminados como residuos valorizables

La problemática de los suelos contaminados es muy extensa y especializada y en este apartado no se analiza la temática, ello se lleva a cabo con detalle en el Capítulo 14 de esta obra, sino que sólo se apunta la posibilidad de su valorización, como si de residuos se tratara con la particularidad que existe en grandes cantidades.

16.1. DEFINICIÓN Y ALCANCE DE LOS SUELOS CONTAMINADOS

Se define de forma genérica como suelo contaminado todo aquel que ha sufrido un cambio en sus características físicas, químicas o biológicas que por su naturaleza, grado de afección o duración en el tiempo, resulte incompatible con sus propiedades funcionales de uso o suponga una amenaza grave para la salud pública o el medio ambiente. Con frecuencia, la contaminación se refiere a los medios más livianos de la bioesfera, como son el medio acuoso y la atmósfera, olvidándose que, por regla general, el último receptor es el suelo.

A escala mundial la preocupación por la contaminación de los suelos es cada día creciente ya que ello afecta directamente a la productividad agrícola y a la alimentación. Las Figuras 4.30 y 4.31 representan la dinámica de los contaminantes atmosféricos en los ecosistemas terrestres. La polución emitida a la atmósfera es transferida al suelo y/o al medio acuoso hasta llegar al medio freático.

La intervención humana en el suelo influye en el ciclo del agua cuando la hermetización y compactación del suelo a través de urbanización y prácticas agrícolas no adecuadas o acciones industriales contamina las aguas. Muchas actividades industriales: centrales termoeléctricas, refinerías, cementeras, siderurgias, industria minera, etc., emiten a la atmósfera cantidades importantes de contaminantes. También el depósito de grandes cantidades de residuos contribuye a la degradación de la calidad del suelo.

Otro sector productivo que puede deteriorar el medio edáfico es la agricultura, a causa del uso masivo de pesticidas. En la actualidad, existen en el mercado 100.000 fórmulas diferentes de fitosanitarios basadas en 1.500 principios activos. Inicialmente se utilizaban pesticidas de naturaleza inorgánica, pero desde la síntesis del DDT, la mayoría de los pesticidas son de naturaleza orgánica y muchos de ellos halogenados.

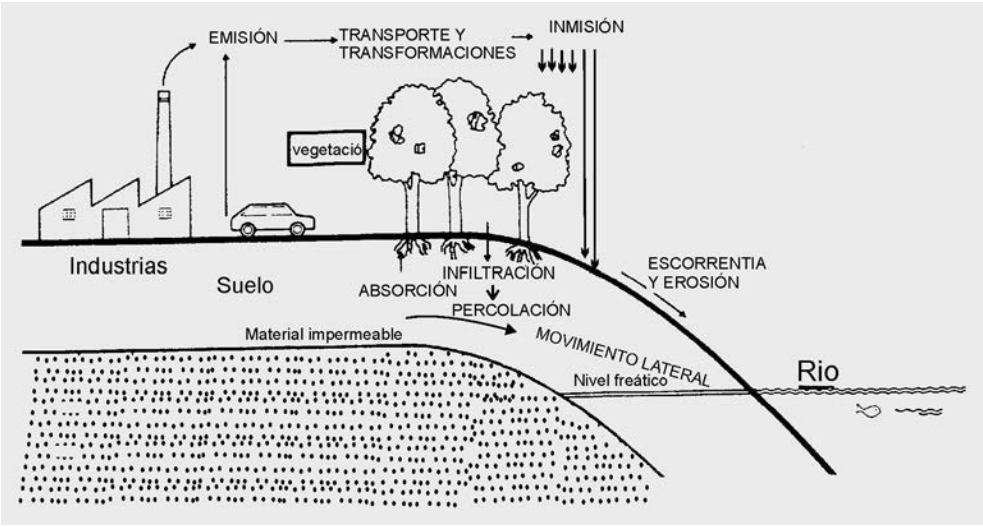


Figura 4.30. Dinámica de los contaminantes atmosféricos en los suelos.

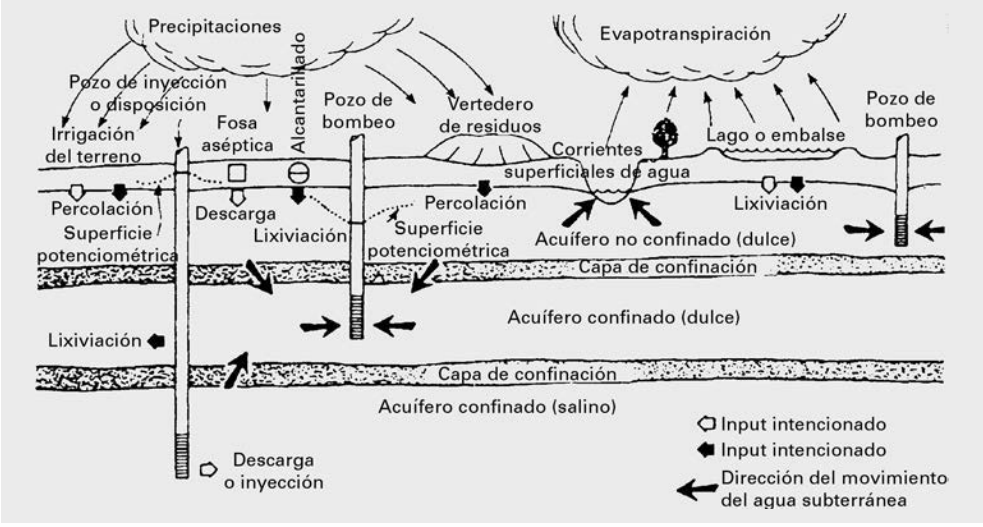


Figura 4.31. La contaminación de los suelos.

16.2. RECICLABILIDAD DE LOS SUELOS CONTAMINADOS

Al igual que sucede con los RSU, un suelo puede tratarse como un residuo de gran masa, que por razones de índole económica debe ser tratado *in situ*. Por esta razón, los suelos pueden ser reciclados, reusados, tratados o depositados en vertederos controlados.

Las tecnologías de limpieza de suelos (*remediation*) están orientadas a reducir la cantidad de contaminantes hasta un nivel que sea aceptable para un tratamiento futuro. En muchos casos, y debido a la caracterización del propio suelo, estos niveles no serán nunca alcanzados ya sea por razones técnicas como económicas. Sin embargo, a poco que la tipología del suelo contaminado lo permita, existen tres tecnologías que permiten la valorización del suelo contaminado con la adición de otros productos que, en muchos casos, también pueden ser residuos:

- La incorporación a masas asfálticas.
- La adición a la fabricación de cemento. La incorporación a hormigones.
- La fabricación de cerámica.

La primera de ellas permite la valorización *in situ*, mientras que para usar las otras dos es preciso transportar el suelo contaminado hasta las plantas, ya sean de cemento o cerámicas.

16.2.1. La incorporación a masas asfálticas

La tecnología consiste en la adición de cal, cenizas volantes o cemento portland al suelo contaminado antes de su mezcla con el asfalto. El suelo contami-

nado se introduce en una criba para separar los elementos indeseables y conseguir un tamaño de grano acorde con el proyecto. Por ejemplo, para una subbase de carretera se precisa un tamaño de 35 mm. Mientras que para un pavimento debe ser de 15 mm o menor. La mezcla se introduce en el tambor de la central asfáltica donde se prepara la mezcla bituminosa. La cantidad que puede usarse depende, en primer lugar de la clase de suelo a valorizar y de sus contaminantes y, en segundo lugar del tipo de obra que pretende realizar. Una ventaja importante es que la planta suele ser transportable y puede llevarse allí donde se halla el suelo contaminado y reciclarlo *in situ*.

La *mezcla asfáltica en caliente*, o HMA (*hot mix asphalt*), en terminología inglesa, es el sistema más usado para la incorporación de residuos, suelos contaminados, en la confección de firmes. Indistintamente se emplea la técnica de preparación en continuo en un tambor rotativo (*drum*), o de forma intermitente (*batch*). Desde el punto de vista de la fabricación ambas tecnologías consisten en mezclar los ingredientes y calentar.

Los agregados, es decir, rocas trituradas, grava y arena, se mezclan y secan antes de ser calentados a 150 ℃. El asfalto caliente se añade a la mezcla anterior en proporciones que oscilan del 5 al 10% en peso. El subproducto a valorizar se halla almacenado aparte. Una vez pesado se incorpora al primer horno giratorio donde se halla en contacto con los gases de combustión (a temperaturas superiores a 1.000 ℃). A estas temperaturas la mayor parte de los hidrocarburos volatilizan y se destruyen térmicamente (los hidrocarburos de cadena larga que no vaporizan o pirolizan serán incorporados a la mezcla asfáltica ya que, químicamente, son productos muy próximos). Los gases resultantes penetran en el segundo reactor, en realidad es la continuación del anterior, y permite secar los agregados, que alcanzan la temperatura deseada. El conjunto, suelo y agregados, se mezclan en caliente y caen a un depósito desde donde un elevador los conduce a una criba y, finalmente a la mezcla con el asfalto.

Los gases, como indica la Figura 4.32, son tratados sucesivamente en un ciclón, donde el material particulado recogido es reenviado al depósito, un *scrubber* (para condensar los posibles gases ácidos), un *demister* (para eliminar las gotas de agua y evitar formación de penachos) y a la chimenea que los emite a la atmósfera. En función de las características del suelo, se puede incorporar una cantidad que oscila entre el 2 y el 10% en volumen de suelo contaminado.

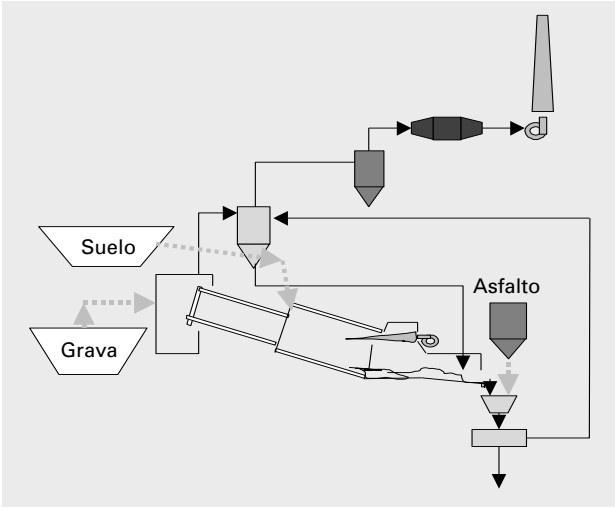


Figura 4.32. Masa asfáltica con suelos contaminados.

16.2.2. La adición a la fabricación de cemento. La incorporación a hormigones

La fabricación de cemento precisa de grandes cantidades de materias primas, como caliza, arena y arcilla. La mayor parte de los suelos tienen una composición que es similar a la que corresponde a las materias primas usadas para la síntesis del clínquer. Cuando el suelo añadido contiene contaminantes ricos en hidrocarburos, las altas temperaturas imperantes en el interior del horno, próximas a los 1.300 ℃, provocan la rotura de los enlaces de las moléculas orgánicas y su destrucción aportando un calor de combustión. Otros hidrocarburos tan solo pirolizan y dejan un residuo carbonoso que es adsorbido por el clínquer que le confiere un color oscuro. Ciertos suelos contaminados con petróleo, o derivados, se trituran por vía húmeda y se inyectan en una zona del horno donde la temperatura media no alcanza los 1.000 ℃. En otras ocasiones estas barbotinas se secan, se trituran y se añaden a las materias primas. Hay que valorar que el tiempo de retención de sólidos en el interior de estos hornos oscila entre 1 y 4 horas. Este dilatado tiempo suele ser suficiente para descomponer los suelos contaminados con independencia de su caracterización.

Debido a la cinética del proceso deben ser rechazados suelos y materias primas ricas en sodio, potasio, cromo, plomo y otros metales, así como con elevados contenidos en cloruros y sulfatos. Provocan un anormal funcionamiento del horno, daños en el refractario del horno o una calidad deficiente del ce-

mento. En general, se puede concluir que el tipo de contaminante ideal contenido en el suelo, para este tipo de horno es el de naturaleza orgánica.

La adición a hormigones es una posibilidad más adecuada para aquellos suelos, o residuos, cuyos contaminantes sean de naturaleza más bien inorgánica. En este caso el tamaño de grano es más secundario y el pH básico imperante en estas mezclas propicia la formación de hidróxidos de metales insolubles.

16.2.3. Materia prima para fabricación de cerámica

Muchos suelos contaminados, en particular aquellos de naturaleza arcillosa, tienen exactamente la misma composición que las materias primas usadas en la industria cerámica que fabrica cerámica estructural.

El suelo se mezcla con las arcillas de interés cerámico a la entrada de la planta. Se trituran conjuntamente y la mezcla sigue los mismos pasos que se haría en una planta convencional: extrusión, secado y cocción. Esta última etapa es la crucial para la valorización de los residuos. El tiempo de residencia de los ladrillos en el interior de los hornos oscila entre 10 y 20 horas, y la temperatura entre 980 y 1.060 ℃. En estas condiciones los contaminantes de naturaleza orgánica se destruirán térmicamente mientras que los de carácter inorgánico quedarán insertados en la matriz cerámica. El mecanismo de ceramización es más seguro que el de clinquerización de cara a la inertización de los metales, puesto que en el seno del material cerámico se crea una fase amorfa, líquida a la temperatura de cocción, que permite atrapar a los metales e insertarlos en la matriz, donde no tienen ninguna posibilidad de lixiviar.

17. Mercado de productos y servicios ambientalmente correctos

Con frecuencia se clasifica a los materiales reciclados de superfluos, suntuosos y de precio muy elevado. Actualmente es cierto que muchos materiales se hallan en su etapa de introducción, y los costes de desarrollo de producto y comercialización son los responsables, en buena medida del sobreprecio. Tampoco se debe menospreciar el hecho de que la logística de recogida de residuos es, en muchos casos, parcial o deficitaria lo que encarece en sobremanera la gestión.

Otro defecto que se imputa a muchos materiales reciclados es su baja calidad. Ello responde más a una percepción que a una realidad. El caso más representativo lo constituye el papel reciclado. El hecho de reciclar el papel repetidas veces conlleva una disminución de la longitud de la fibra, lo que acarrea, indefectiblemente, una merma en la calidad del papel respecto al fabricado con fibra virgen. No obstante, el papel reciclado sigue siendo perfectamente válido para muchas aplicaciones de vida efímera, como puede ser el papel de revistas y periódicos. No resulta igual en otros materiales reciclados, como el vidrio y el aluminio. De todas maneras, la progresiva introducción de nuevas tecnologías conduce a una mejora cada día más notoria de la calidad. A ello también contribuyen las aportaciones de las diversas administraciones con los distintivos de calidad y las etiquetas ecológicas.

Como norma general, para reducir el impacto ambiental de los productos y servicios se debe prescindir, en su elaboración, de sustancias incompatibles con el medio ambiente. También se debe tener en cuenta los siguientes parámetros:

- Que contengan un porcentaje de material reciclado lo más elevado posible.
- Que tengan una vida útil larga.
- Que su reparación sea fácil.
- Que sean reutilizables o destinables a nuevos usos.
- Que se fabrique con un bajo consumo energético y pocas materias primas.
- Que no sea problemático en el postconsumo.

Las características de los productos y servicios medioambientalmente correctos se pueden sintetizar en las siguientes premisas:

- Que estén exentos de sustancias peligrosas para la salud y el medio ambiente.
- Que para su producción se use materia prima virgen regenerable o reciclada.
- Que la fabricación consuma un mínimo de recursos y genere pocos residuos y emisiones tanto durante la fabricación, como en la vida útil y el postconsumo.
- Que su composición sea homogénea, salvo que se demuestre claramente su reciclabilidad.
- Que sean fácilmente reciclables o destinables a nuevos usos.

Los ecobalances constituyen una herramienta importante para realizar estudios comparativos en cuanto a consumos de energía, consumos de materias primas y las repercusiones ambientales de los nuevos materiales en comparación con las alternativas existentes.

17.1. INDUSTRIAS CONSUMIDORAS DE RESIDUOS INDUSTRIALES

El empleo de residuos en las obras civiles viene de muy antiguo. Sin embargo, en los últimos tiempos la elevada exigencia en la calidad de los materiales frena a algunos contratistas en su intención del empleo de materiales recuperados por el simple desconocimiento del efecto que determinados componentes de los residuos empleados puedan tener a largo plazo.

Por otra parte, los aspectos puramente ambientales, provocan curiosamente un freno en ciertas aplicaciones, puesto que los constructores no quieren correr riesgos en las obras. Por ejemplo, ¿quién asegura qué sucederá al cabo de 30 años con un hormigón al que se le han incorporado metales pesados, si el medio atmosférico se torna particularmente agresivo, si de repente aumentan las precipitaciones en forma de lluvia ácida? ¿Qué sucederá con los lixiviados?

Con todas las restricciones expuestas, algunos países más desarrollados, como los Países Bajos, sólo en el año 1988 reciclaron más de 100 millones de toneladas de residuos industriales. Si bien algún tipo de residuo es muy específico de este país, la Tabla 4.38 expone una relación bien ilustrativa de la valorización llevada a cabo por diversos sectores industriales, con la indicación cualitativa de la tendencia.

Tabla 4.38. Tendencia en el consumo de residuos en los Países Bajos

Mercado	Consumo en 1988 (106 toneladas)	Tendencia para el año 2000
Construcción, diques, embarcaderos, etc.	50	+
Asfalto	8	0
Protección de costas	3	0
Adición a hormigones	15	+
Prefabricados de hormigón	13	+
Cerámicas	5	+
Cementeras	5,5	–
Silicato cálcico	4	+
Industria consumidora de yeso	0,6	+

(+: aumento; –: desconocimiento; 0: sin cambio).

17.2. LA COMPRA VERDE

En los últimos años, las administraciones han llevado a cabo un esfuerzo para potenciar el uso de los productos reciclados. Una de estas herramientas es la denominada compra verde (por ejemplo, la Administración autonómica catalana, hace años que solo compra papel reciclado para sus oficinas).

Consiste en tener en cuenta la variable medioambiental en el momento de escoger los productos o los proveedores, es decir, elegir aquellos productos que a lo largo de su ciclo de vida son menos perjudiciales para el medio ambiente y aquellos proveedores que realizan una gestión ambiental de sus empresas. Estos productos y servicios se identifican principalmente por el etiquetado ecológico (EcoLabel, Ángel Azul, etc.) y los sistemas de gestión ambiental (ISO 14000, EMAS) autorizados por las autoridades designadas para cada caso.

La administración fomenta la compra verde y cada vez más incorpora criterios ambientales a sus procesos de contratación.

18. Instalaciones, mecanismos y herramientas para reducir el impacto de los residuos

En este apartado se lleva a cabo una ligera introducción a los ecoparques, que se desarrollan ampliamente en el Capítulo 11 de esta obra, y se realiza una incursión a determinados mecanismos o herramientas útiles para minimizar el impacto ambiental.

18.1. ECOPARQUE

En primer lugar hay que dejar claro que el término Ecoparque, procede de la ciudad danesa de Kalundborg, donde se diseñó un polígono industrial en que los residuos de cada fábrica era aprovechados por

otra del polígono hasta conseguir un residuo final cero, o casi nulo. Es decir un sistema industrial altamente eficiente desde el punto de vista ambiental, como muestra la Figura 4.33.

En el ámbito urbano la acepción de la palabra ecoparque se refiere a unos espacios normalmente situados en las inmediaciones de las ciudades, destinados a la gestión y tratamiento de residuos de origen doméstico. Según la envergadura de la instalación y la característica de la población a la que sirve, la dirección del ecoparque dicta una lista de residuos admisibles y no admisibles. La Tabla 4.39 expone un ejemplo bastante representativo.

En su acepción más amplia el término ecoparque hace referencia a un centro no sólo de recogida (como las «desecherías», «puntos verdes» o «puntos límpios») sino a auténticas plantas de tratamiento de residuos. El objetivo de la construcción de un centro

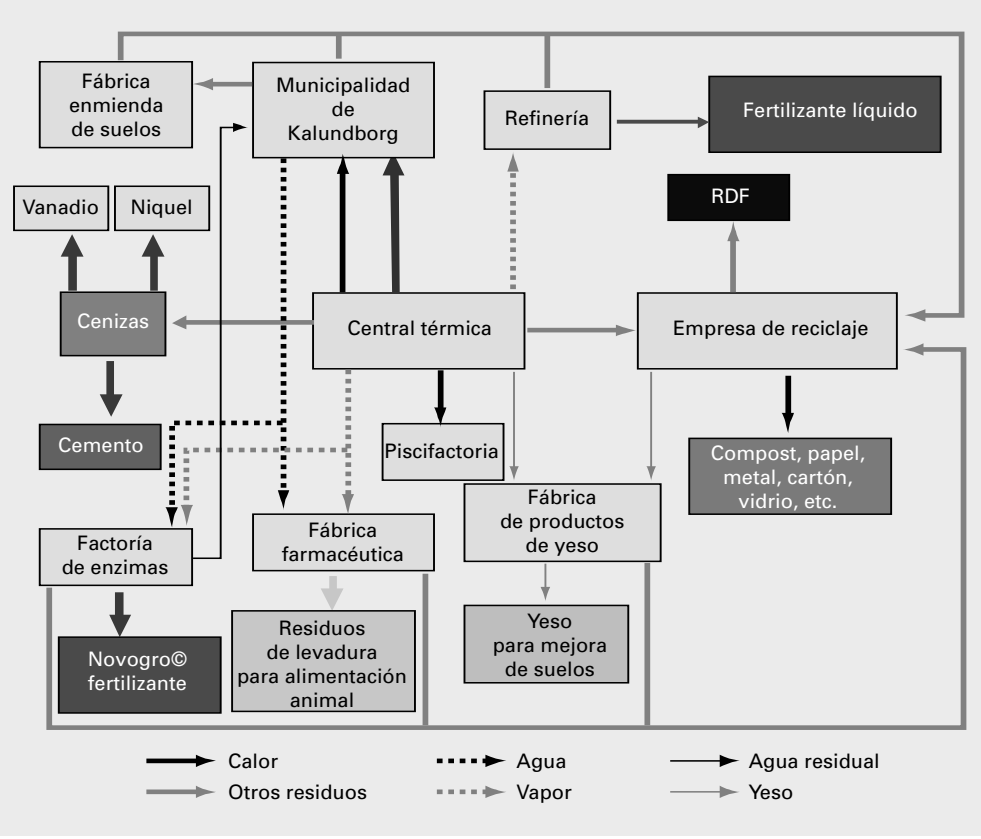


Figura 4.33. Ecoparque o parque Ecoindustrial de Kalundborg.

Tabla 4.39. Listado de residuos admisibles y no admisibles en un ecoparque.

Residuos admisibles			Residuos no admisibles
Normales	**Voluminosos**	**Especiales**	
– Vidrio plano. – Botellas. – Papel. – Cartón. – Metales. – Maderas. – Textiles.	– Electrodomésticos. – Muebles y similares. – Colchones. – Somieres. – Puertas, ventanas y marcos. – Restos de poda. – Escombros inertes. – Envases metálicos.	– Aceites de vehículos. – Baterías de vehículos. – Pilas (todas). – Aerosoles. – Pinturas. – Barnices. – Disolventes no tóxicos. – Radiografías. – Tubos fluorescentes. – Neumáticos. – Electrodomésticos con CFC's. – Chatarra electrónica. – Aceites vegetales.	– RSU. – Medicamentos. – Residuos infecciosos. – Líquidos de fotografías. – Envases de productos tóxicos. – Residuos radiactivos. – Pesticidas. – Productos fitosanitarios. – Residuos no identificados.

de tratamiento de residuos es cumplir con los trabajos de eliminación legalmente impuestos en ciudades o áreas obligadas a la eliminación de residuos de la manera más económica y eficiente posible, siempre cumpliendo con la normativa vigente. La creación o el mantenimiento de puestos de trabajo es un argumento político de gran importancia. A través de la combinación de varias plantas de tratamiento de residuos en un lugar se pueden aprovechar efectos sinérgicos (de ahí el término de «ecoparque») que conducen a reducciones considerables de los costes:

- Recepción, pesado y control de entrada comunes.
- Utilización de la energía procedente de las instalaciones de combustión o de fermentación para cubrir el consumo propio de energía de las plantas.
- Cortos caminos de transporte para los rechazos.
- Tratamiento común de aguas residuales.
- Administración común.
- Edificios sociales comunes.

La mayoría de los ecoparques nacieron a lo largo de la década de 1980 a partir de las plantas de compostaje o de plantas incineradoras de residuos debido a que el progreso de las leyes iba imponiendo nuevos objetivos; otra razón fue la normativa más estricta para los productos finales de la reutilización (valorización); por ejemplo, junto a las plantas de compostaje resultaba necesario crear plantas adicionales de tratamiento.

La mayoría de los ecoparques son gestionados por empresas privadas o semi privadas. Los propietarios de las plantas y de las compañías explotadoras son, en la mayoría de los casos, las ciudades o las comarcas, que han delegado sus trabajos de eliminación a estas compañías. En los ecoparques se pueden (o podrían) tratar los siguientes tipos de residuos según el diseño de la instalación:

- Residuos domésticos.
- Fangos de depuración.
- Residuos industriales similares a los RSU.
- Residuos biológicos.
- Residuos vegetales (de poda).
- Materiales recogidos selectivamente.
- Materiales de embalaje con el «punto verde».
- Papel.
- Vidrio.
- Plásticos de la agricultura.
- Chatarra electrónica.
- Madera usada.
- Escombros.

18.2. NOCIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL

Se entiende por impacto ambiental la alteración que se produce sobre el entorno, la salud y el bienestar del hombre como consecuencia de la realización de un proyecto, en comparación con el escenario que existiría si el mencionado proyecto no se ejecutara.

En la Unión Europea se comenzó a trabajar sobre los estudios de impacto en la década de 1970, llegándose a la promulgación de la Directiva 85/337/CEE relativa a la evaluación de las repercusiones de determinados proyectos de obras sobre el entorno. En España esta Directiva ha sido transpuesta al derecho interno por el Real Decreto Legislativo 1302/1986 de Evaluación de Impacto Ambiental (EIA).

Como se indica en dicha Directiva se deben analizar los efectos directos e indirectos de los proyectos sobre los siguientes factores:

- El hombre, la fauna y la flora.
- El suelo, el agua, el aire, el clima y el paisaje.
- La interacción entre los factores mencionados en los puntos anteriores.
- Los bienes materiales y el patrimonio cultural.

Los pasos a seguir para realizar el estudio de impacto ambiental son los siguientes:

- *Evaluación de Impacto Ambiental:* proceso encaminado a identificar, predecir, extrapolar, interpretar y prevenir los efectos del proyecto sobre el medio ambiente.
- *Memoria-resumen:* documento en el que se recogen las características más sobresalientes del proyecto y se envían a la autoridad competente para iniciar el procedimiento de EIA.

Estudio de Impacto Ambiental propiamente dicho. En la última etapa se miden los diferentes impactos en unidades ambientalmente homogéneas, parte que se denomina Valoración de Impacto Ambiental.

Declaración de Impacto Ambiental, llamado también Informe Final o Dictamen Ambiental. Es el informe que emite la Autoridad Ambiental según las alegaciones procedentes de la exposición pública.

18.3. ETIQUETA ECOLÓGICA

La creciente sensibilidad de la ciudadanía en los temas referentes al medio ambiente y la imperiosa necesidad de reciclar los residuos han llevado a los gobiernos a incentivar la fabricación de productos y materiales más respetuosos con el medio ambiente. Para ello se han creado una serie de etiquetas y/o distintivos con los que se da a conocer la bondad del material en cuestión. La metodología para otorgar una etiqueta ecológica es la siguiente:

- Los productos se clasifican en partidas homogéneas (por ejemplo, lavadoras, papel de cocina, pinturas de interior, papel higiénico, lavavajillas, etc.) que reciben el nombre de categorías de productos.
- Se establecen unos baremos o normas, con una validez prefijada, para la elaboración de las categorías de productos. Así, las lavadoras deben tener unos límites en el consumo de agua y electricidad; el papel debe ser, en un buen porcentaje, reciclado, no debe contener una determinada cantidad de metales; las pinturas deben ser solubles en agua, etc.

Obviamente, las normas para otorgar un distintivo de calidad son cada vez más estrictas, lo que obliga a los fabricantes a buscar nuevos métodos de fabricación y materias primas alternativas. Todos los productos deben someterse a una serie de tests y análisis en laboratorios homologados. Lucir el distintivo y/o etiqueta supone un coste y su renovación está en manos de la autoridad competente.

Casi cada país de la UE tiene su propia etiqueta ecológica, sin embargo se está pensando en otorgar una de carácter supranacional.

18.4. SISTEMA DE ECOGESTIÓN Y ECOAUDITORÍA EN LA UE

La necesidad de converger hacia un desarrollo sostenible, así como la creciente sensibilidad ambiental de la ciudadanía hacia la protección del medio ambiente, ha propiciado que los diversos Estados miembros de la UE establezcan políticas y programas con el objetivo de conseguir una mejora continua y razonable de las actuaciones medioambientales. Por ello la UE ha desarrollado un sistema de gestión y auditoria medioambiental, conocido como EMAS (*Eco-Management and Audit Scheme*). El EMAS es un sistema que permite a las empresas:

- Asegurar un alto nivel de protección del medio ambiente.
- Mejorar continuamente su comportamiento ambiental.
- Obtener una ventaja competitiva a partir de estas mejoras.
- Hacer pública su gestión medioambiental.

El sistema EMAS va destinado a las empresas de actividades industriales y consumidoras de energía, así como a las actividades de reciclaje y tratamiento de residuos. Los hitos más relevantes del EMAS pueden resumirse en:

- Ahorro general de costos de fabricación:
  - Mejora del control de la fabricación.
  - Optimización del consumo de energía y recursos.
  - Optimización en los costes derivados del tratamiento de los efluentes.
  - Reducción del coste en las primas de seguros de todo tipo.
  - Ahorro de las sanciones por infracciones.
  - Disminución del riesgo de toda clase de accidentes.
- Mejora de la imagen de la empresa:
  - Mejora de la imagen frente a los clientes.
  - Herramienta de marketing con el uso de la etiqueta o distintivo ecológico.
- Cumplimiento de la legislación y relaciones con la Administración:
  - Adopción de una política ambiental activa.
  - Facilidad en la obtención de permisos y licencias.
  - Aumento en la posibilidad de recibir ayudas del sector público.
- Aumento en la motivación del personal empleado:
  - Potenciación en la formación del personal a todos los niveles.
  - Implicación del personal del centro para conseguir los objetivos.

Como consecuencia de todo ello se observa un mayor rendimiento que se traduce en una mejora de

la competitividad. Las etapas en la implantación del sistema EMAS son las siguientes:

- Establecer la política medioambiental.
- Evaluación medioambiental inicial del centro de trabajo.
- Sistema de gestión medioambiental.
- Auditoría medioambiental del centro.
- Declaración medioambiental.
- Verificación del sistema de gestión y validación de la declaración ambiental.

18.5. CONTROL INTEGRADO DE LA CONTAMINACIÓN (IPPC)

Con la entrada en vigor de la Directiva 96/61/CE, de 24 de septiembre de 1996 relativa a la Prevención y Control Integrado de la Contaminación (IPPC, iniciales correspondientes al término anglosajón), se abre un nuevo período para la industria europea, ya que con fecha límite de 1999 todas las actividades relacionadas con la combustión, metalurgia, química y gestión de los residuos tuvieron que ponerse al día en cuanto a tecnología y niveles de emisión permitidos. La gran diferencia con respecto a las normas comunes es que la IPPC engloba los vectores clásicos (atmósfera, agua y suelo) en uno solo.

En la Directiva 96/61/CE aparecen explicitadas los siguientes tipos de instalaciones:

- Instalaciones para la valorización de residuos peligrosos, incluida la gestión de aceites usados, o para la eliminación de dichos residuos en lugares distintos de los vertederos, con una capacidad de más de 10 toneladas diarias.
- Instalaciones para la incineración de los residuos municipales, de una capacidad superior a tres toneladas por hora.
- Instalaciones para la eliminación de residuos no peligrosos, en lugares distintos de los vertederos, con una capacidad de más de 50 toneladas diarias.
- Vertederos de todo tipo de residuos que reciban más de 10 toneladas diarias, o que tengan una capacidad de más de 25.000 toneladas, con exclusión de los vertederos de residuos inertes.

El programa comunitario de medio ambiente considera prioritario el control integrado de la contaminación, ya que el tratamiento por separado del control de las emisiones a la atmósfera, al agua o al suelo puede potenciar la transferencia de contaminación entre los diferentes ámbitos del medio ambiente, en lugar de protegerlo en su conjunto. El titular de una instalación que solicite permiso para una nueva industria, que entre de lleno en algunos de los epígrafes señalados, deberá adjuntar a su solicitud una descripción de la instalación, del tipo y alcance de las actividades, las materias primas y auxiliares, sustancias y energías empleadas, fuentes de emisión, ubicación, estudio de impacto ambiental, medidas correctoras, etc.

El permiso otorgado especificará claramente que los límites de los efluentes (anexo III) no sobrepasarán los valores fijados. Si fuera necesario, el permiso incluirá las adecuadas prescripciones que garanticen la protección del suelo y las aguas subterráneas, así como las medidas relativas a la gestión de los residuos generados por la instalación. En determinados casos, los valores límite de emisión podrán ser completados o reemplazados por parámetros o actuaciones técnicas equivalentes.

Los valores límites se basarán en las mejores tecnologías disponibles, es decir, la tecnología utilizada junto con la forma en que la instalación esté diseñada, construida, mantenida, explotada y paralizada. En todos los casos las condiciones del permiso establecerán disposiciones relativas a la minimización de la contaminación de la contaminación a larga distancia. Otra característica es la disposición sobre simplificación de trámites administrativos asociados a la tramitación de los permisos.

Para dar cumplimiento al capítulo de la minimización se han creado diversos foros de intercambio sobre las mejores tecnologías disponibles. Y para ello se han establecido diversas comisiones interdisciplinares de trabajo sobre diversos sectores.

Bibliografía

AGEJAS DOMÍNGUEZ, L. A. *Biocombustibles. Utilización de los aceites vegetales como energía renovable.* Madrid: Ministerio de Cultura, Pesca y Alimentación, 1996.

AHN, Y. H., HWANG, I. S., MIN, K. S. ANAMMOX and partial denitritation in anaerobic nitrogen removal from piggery waste. *Water Sci. Technol*. 2004. 49(5-6): 145-153.

AIAS. *Galvanotecnia i medi ambient. Guia pràctica per a una correcta gestió ambiental*. Ed. Departament de Medi Ambient. Generalitat de Catalunya. Barcelona.

ALLEN, D. *Pollution prevention at the macro scale: flows of wastes, industrial ecology and life cycle analysis*. Dpt. of Chemical Eng. University of California. USA, 1990.

Asociación nacional de fabricantes de pasta de papel y cartón. Informe Estadístico. 1997. Madrid.

BABOT, D. *et al. Técnicas de gestión medioambiental en producción porcina.* (http://www.projectetrama.com /interior.asp?mod=guies&u=gga_guies#72). Fundació Catalana de Cooperació. Lleida, 2004.

BELTRAN, J. *et al.* Depuración de alpechín mediante un sistema de fangos activados. *Revista Tecnología del Agua*. 1999. Núm. 195. Diciembre.

BOIXADERA, J., TEIRA, M. R. (ed.) *Aplicación agrícola de residuos orgánicos.* Edicions UdL. Lleida, 2001.

BOLEA, E. *Evaluación del impacto ambiental*. ITSEMAP. Madrid, 1984.

BONMATÍ, A. *Digestió anaeròbia de purins amb altres residus orgànics*. Pagès editors. Lleida, 1998.

BONMATÍ, A. *Thermal energy uses for the improvement of pig slurry anaerobic digestion and the recovery of useful products*. Tesis doctoral. UdL. Lleida, 2001.

BONMATÍ, A., FLOTATS, X. Air stripping of ammonia from pig slurry: characterisation and feasibility as a pre- or post-treatment to mesophilic anaerobic digestion. *Waste Manage.* 23: 261-272, 2003[2].

BONMATÍ, A., FLOTATS, X. Pig slurry concentration by vacuum evaporation: influence of previous mesophilic anaerobic digestion process. *J. Air & Waste Manage. Assoc.* 2003[1]. 53: 21-31.

BURTON, C. H., TURNER, C. *Manure management: Treatment strategies for sustainable agriculture.* Silsoe Research Institute. Bedford, UK, 2003.

CAMPOS, E. *Optimización de la digestión anaerobia de purines de cerdo mediante codigestión con residuos orgánicos de la industria agroalimentaria*. Tesis doctoral. UdL. Lleida, 2001.

CAMPOS, E. *et al. Guia de Tractaments de les Dejeccions Ramaderes*. (http://www.arc-cat.net/altres/purins/guia.html). ARC y DARP de la Generalitat de Catalunya. Lleida, 2004.

Comisión Nacional de la Energía. *Informe sobre el marco regulatorio de los biocarburantes, con identificación de barreras para su desarrollo en España y especial consideración de los aspectos asociados a las actividades de logística y distribución.* Septiembre 2005.

DANÈS, R., MOLINA, V., PRATS, I. LL., ÁLAMOS, M., BOIXADERA, J., TORRES, E. *Manual de gestió dels purins i de la seva reutilització agrícola.* DMA, JR y DARP de la Generalitat de Catalunya. 2.ª ed. Barcelona, 1996.

DÍAZ, A. y RAMOS, A. *La práctica de las estimaciones de impactos ambientales*. Fundación Conde del Valle de Salazar. ETSIM. Madrid, 1987.

ELIAS, X. Los Ecoparques industriales. *Jornadas «L'avaluació ambiental aplicada a les nives arees d'activitat económica»*: Olot (Girona, 9/2005).

ELIAS, X. *La gestión de los residuos a debate interdisciplinar.* Ed. Ategrús. Bilbao, 1994.

ELIAS, X. *Tratamiento y valorización energética de Residuos*. Madrid: Editorial Díaz de Santos, 2005.

Empresa pública para el Desarrollo Agrario y Pesquero. *Estado Actual y perspectivas del biodiesel en Andalucía.* Consejería de Agricultura y Pesca. Junta de Andalucía. Septiembre 2000.

Escola Universitària d'Enginyeria Tècnica Industrial d'Igualada. *Curs de Medi Ambient*. Igualada. 1993. ISBN 84-600-8336-5.

EUM, Y., CHOI, E. Optimization of nitrogen removal from piggery waste by nitrite nitrification. *Water Sci. Technol*. 45(12): 89-96, 2002.

FELIUBADALÓ, J. *Árbol de decisión para el tratamiento de residuos*. Entitat de Medi Ambient. Área Metropolitana de Barcelona. 1997.

FLOTATS, X., BONMATÍ, A., CAMPOS, E., TEIRA, M. R. El proceso de secado de purines en el marco de una gestión integral de residuos ganaderos. *Residuos*. 53: 40-46, 2000.

FLOTATS, X., CAMPOS, E. Hacia la gestión integrada y cotratamiento de residuos orgánicos. *Retema.* 81: 41-53, 2001.

FLOTATS, X., CAMPOS, E. Procesos biológicos: digestión anaerobia y compostaje. En: ELIAS, X. (ed.). *Tratamiento y valorización energética de residuos*. Díaz de Santos. Madrid, 617-686, 2005.

FLOTATS, X., CAMPOS, E., PALATSI, J., BONMATÍ, A. Digestión anaerobia de purines de cerdo y codigestión con residuos de la industria alimentaria. *Porci.* 65: 51-65, 2001.

FLOTATS, X., PALATSI, J. Tecnologías de tratamiento de purines de cerdo. *Nuestra Cabaña.* 323: 48-57, 2003.

FORD, M. *et al. Mechanical Solid-Liquid Separation of Livestock Manure. Literature Review.* (http://www.ridgetownc.on.ca/research/rfleming/Reports/separator.pdf).

Ridgetown College. University of Guelph. Ontario, Canada, 2002.

FREEMAN, H. M. *Standard handbook of hazardous waste treatment and disposal*. McGraw-Hill. New York.

GARCIA LOZANO, E. *Residuos tóxicos y peligrosos. Tratamiento y eliminacion*. Ed. MOPTMA. Madrid.

Generalitat de Catalunya. Departament de Medi Ambient . *Prevenció de la contaminació en el sector de l'adobament de la pell.* (Manuals d'ecogestió 15). Barcelona. 2003. ISBN 84-393-6111-4.

GURRI, A. ABT: planta de purines en Calldetenes. *PORCpress*. 29: 6-14, 2004.

HWANG, I. S., MIN, K. S., CHOI, E.; YUN, Z. Nitrogen removal from piggery waste using the combined SHARON and ANAMMOX process. *4th World Water Congress and Exhibition*. Marrakech, Morocco, 19-24 Sept., 2004.

Instituto Cerdá. *Manual de minimización de residuos y emisiones gaseosas.* Vol. I, II y III. Ed. Ingoprint, S.A. 1992.

LÓPEZ , J. L., GUIJOSA, L., SANZ, J. M. *Los aceites vegetales como combustibles para motores*. Valladolid: Secretariado de Publicaciones e Intercambio Científico Universidad de Valladolid, 1995.

LUND HERBERT, F. *The McGraw-Hill recycling handbook*. McGraw-Hill, Inc. New York.

LUYBEN, P. D. y BAILEY, J. S. Newspaper recycling: the effects of rewards and proximity of containers. E*nvironmental and Behavior*, 1979, Vol. 10.

MAEKAWA, T., LIAO, C.-M., FENG, X.-D. Nitrogen and phosphorus removal for swine wastewater using intermittent aeration batch reactor followed by ammonium crystallization process. *Water Res*. 29(12): 2643-2650, 1995.

MAGRÍ, A., FLOTATS, X. Tratamiento de la fracción líquida de purines de cerdo mediante un reactor discontinuo secuencial (SBR). *Residuos*. 57: 84-88, 2000.

MARTÍNEZ RODRÍGUEZ, M. *Utilización de aceites vegetales usados para la producción de biodiesel*. Madrid: Laboratorio de Procesos Químicos y Bioquímicos Integrados. Universidad Complutense de Madrid, 2001.

Ministerio de Medio Ambiente. *Guía de las mejores técnicas disponibles en España del sector de curtidos*. Centro de publicaciones Secretaria General Técnica Ministerio de Medio Ambiente. Madrid. 2003. ISBN 84-8320-255-7.

MORERA, J. M. *Procesos de Curtidos*. Escola Universitària d'Enginyeria Tècnica Industrial d'Igualada-Escola Superior d'Adoberia. Igualada. 2000. ISBN 84-931837-0-9.

PARDINI ANTON *et al.* The effect of strength of commitent on newspaper recycling. Journal of Environmental Systems, 1983, Vol. 13.

QUERALT, R. y MARTÍNEZ, E. Las aguas residuales en la industria papelera. Evolución histórica de sus características y técnicas de depuración. Tecnología del agua, n.º 158, págs. 17-28.

SOLÉ, F., FLOTATS, X. *Guía de técnicas de gestión ambiental de residuos agrarios*. (http://www.projectetrama.com/interior.asp?mod=guies&u=gga_guies#72). Fundació Catalana de Cooperació. Lleida, 2004.

SOLER, J. *Química técnica de curtición*. Escola Universitària d'Enginyeria Tècnica Industrial d'Igualada-Escola Superior d'Adoberia. Igualada. 2000. ISBN 84-1837-2-5.

TEIRA, M. R., FLOTATS, X. A method for livestock waste management planning in NE Spain. *Waste Manage.* 23: 917-932, 2003.

TEIRA, M. R. *et al.* A case study on livestock waste management: Juncosa de les Garrigues (Catalonia, Spain). En: MORENO, S.; MORENO, J.M.; ELVIRA, B. (ed.) *Avances en Ingeniería Ambiental. Libro de Textos Completos de las Jornadas Internacionales de Ingeniería Ambiental. Aire, Suelos, Residuos, Modelización Ambiental*. Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, UPCT. Vol. 1, 283-292. Cartagena, 2001.

VAN DONGEN, L. G. J. M., JETTEN, M. S. M., VAN LOOSDRECHT, M. C. M. *The combined Sharon/Anammox process*: *a sustainable method for N-removal from sludge water*. IWA Publishing. London, 2001.

VICENTE, G. MARTINES, M. y ARACIL, J. Ésteres metílicos como combustibles. Materias primas y propiedades, *Tecno-Ambiente*, 85(10), 9-12. 1988.

VICENTE, G. MARTINES, M. y ARACIL, J. Ésteres metílicos de girasol: Alternativa al combustible diesel mineral, *Ingeniería Química*, 355(3), 153-159. 1988.

WAGNER, T. P. *The hazardous waste Q & A.* Van Nostrand Reinhold. Amsterdam.

Páginas web de interés

www.acbiodiesel.net
www.anbio.es
www.appa.es
www.biodiesel.com.ar
www.biodiesel.org
www.ccoo.es
www.ecobus.net
www.emtvalencia.es
www.energias-renovables.com
www.infoenergis.com
www.madrid.org

Residuos destinados a la fabricación de materiales aislantes

5

Xavier Elias

ÍNDICE

1. Generalidades, conceptos y propiedades derivadas de los residuos ligeros 263
1.1. Aislamiento térmico y medio ambiente..... 263
1.2. Transferencia de calor..... 271
1.3. Aislamiento acústico..... 278
2. Aplicaciones de residuos para la fabricación de aislantes 280
2.1. Uso de residuos a granel como aislantes térmicos y acústicos 280
2.2. Ladrillo aislantes fabricados con fangos.... 282
2.3. Aislantes a partir de polvo de vidrio 285
2.4. Cerámicas porosas para filtros 286
2.5. Hormigones ligeros de escorias 287
2.6. Áridos expandidos a partir de residuos 287
2.7. Áridos artificiales a partir de escorias RSU. 292
2.8 Obtención y empleo de microsílece..... 292
2.9 Valoración del papel usado 297
2.10. Materiales a partir de fibras y madera residual..... 305
2.11. Residuos procedentes de otras industrias... 313
3. Sustratos y soportes..... 321
3.1. Soportes agrícolas a partir de residuos 323
3.2. Soporte cerámico fabricado con residuos.... 324
3.3. Residuos útiles como fertilizantes 326
4. Aislantes fabricados a partir de residuos 327
4.1. Residuos empleados en la fabricación del silicato cálcico 328
4.2. Valoración de residuos de yeso..... 329
5. Pantallas acústicas..... 332
5.1. Uso de neumáticos usados en pantallas acústicas..... 333
5.2. Uso de otros materiales para la fabricación de pantallas 333
5.3. Ruido y salud..... 334
6. Materiales ecológicos para la construcción..... 335
6.1. Sostenibilidad de los matriales cerámicos... 336
6.2. La problemática de los materiales compuestos 337
Bibliografía..... 337

RESUMEN

El espíritu de este capítulo consiste en describir un conjunto de reciclajes de diversos materiales orgánicos, o básicamente orgánicos, por lo que su común denominador es que se trata de materiales ligeros.

El capítulo comienza por una revisión teórica de unas tecnologías y conceptos precisos para entender mejor las posibilidades de valorización.

El resto del capítulo se destina a ofrecer ejemplos de valorización de residuos de los denominados ligeros para su valorización en diferentes formas o materiales.

1. Generalidades, conceptos y propiedades derivadas de los residuos ligeros

Como se justificará más adelante la noción de ligereza se halla íntimamente relacionada con el aislamiento, el ahorro de energía y también con el reciclaje de residuos de naturaleza liviana. La calidad del aislamiento térmico en edificios puede representar una de las carencias que afecten indirectamente al medio ambiente, ya que las construcciones mal aisladas inciden en la calidad de vida y suponen un gasto adicional de combustible en climatización.

Los residuos orgánicos, en general ligeros, tratados cerámicamente o por medio de tecnologías semejantes permiten su inertización a la vez que crean una red de poros que son los responsables del aislamiento térmico. Otra propiedad que se puede potenciar con la valorización de ciertos residuos ligeros es la de la fabricación de materiales con capacidad de absorción acústica.

Las posibilidades de aprovechamiento de residuos y su relación con el medio ambiente son larguísimas, a titulo de introducción la Figura 5.1 muestra la confección de una manta de aislante a base de plumas de aves que, posteriormente se emplea como aislante térmico y absorbente acústico.

Figura 5.1. Aislante térmico a base de plumas.

Este capítulo presenta una serie de ejemplos de reciclaje de residuos livianos para su reciclaje, mayoritariamente, en materiales de construcción.

1.1. AISLAMIENTO TÉRMICO Y MEDIO AMBIENTE

Es imposible separar la generación y uso de la energía con la afección al medio ambiente que ello produce. Es obvio que no todas las energías inciden en la degradación del medio en la misma medida. Así mientras que la mayoría de los combustibles fósiles contribuyen al efecto invernadero y a la lluvia ácida, los residuos nucleares representan un grave problema de tratamiento de residuos todavía no resuelto y la energía de origen hidráulico no está exenta de implicaciones medio ambientales. De hecho las únicas energías que afectan mínimamente al medio son algunas de las renovables y/o alternativas.

Este preámbulo permite relacionar dos hechos tan importantes como son la generación de energía necesaria para solventar los problemas ocasionados por los deficientes aislamientos con la necesidad de aprovechar los residuos para la fabricación de materiales alternativos que, a su vez, coadyuven al ahorro de energía.

Las viviendas y edificios en general deben estar térmicamente aislados. El defectuoso aislamiento térmico en un país de clima relativamente templado como es España genera unas necesidades de acondicionamiento que ocasiona una contaminación equivalente al 25% de todo el sector industrial o bien al 30% del transporte.

La pérdida o ganancia de calor indeseada a través de las paredes es muy importante y tiene lugar tanto en invierno como en verano. El gráfico de la Figura 5.2 simboliza la carga térmica anual precisa en una vivienda de 100 m^2 en función de la calidad de su aislamiento térmico. Como muestra el gráfico la carga térmica es semejante en invierno que en verano. Una vivienda mal aislada precisa una mayor carga térmica tanto en verano, como en invierno debido a las transferencias de calor a través de los muros, suelo, techos y ventanales.

A primera vista parece que una deficiencia de aislamiento térmico debería afectar por igual a la carga

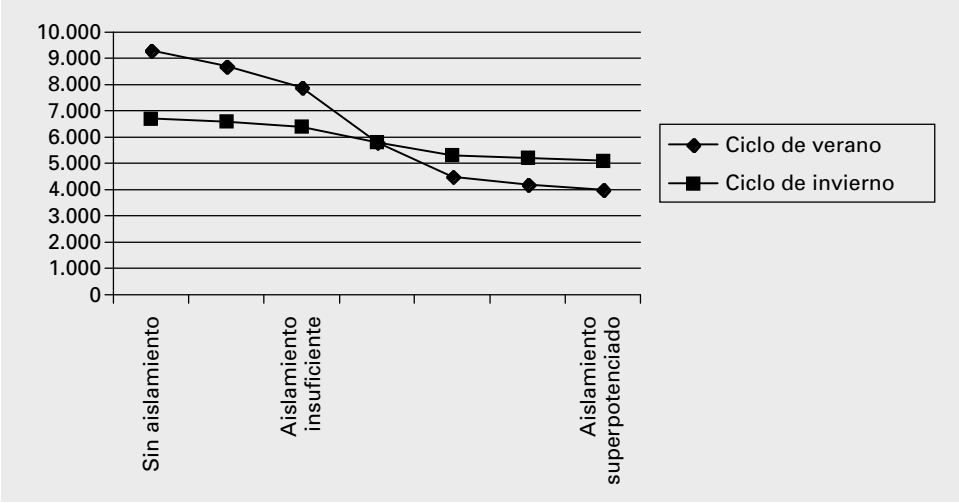


Figura 5.2. Carga térmica kWh/año.

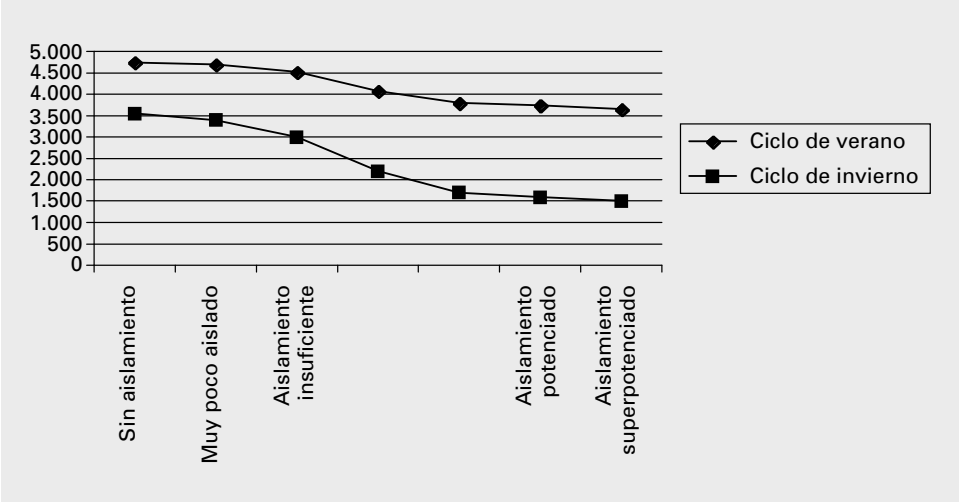


Figura 5.3. Emisiones en kg. de CO_2/año.

térmica tanto en el ciclo de verano como en el de invierno. Sin embargo en verano, y sin aislamiento, la vivienda sufre una fuerte incidencia de la radiación solar, circunstancia que aumenta la carga térmica.

El gráfico de la Figura 5.3 muestra las emisiones de CO_2 para un escenario equivalente al expuesto. Obsérvese que el régimen de funcionamiento en verano es desfavorable puesto que los acondicionadores de aire funcionan con electricidad y ésta se genera, mayoritariamente, con combustibles fósiles.

La calidad térmica de la edificación tiene mucho que ver con la normativa imperante en lo referente al aislamiento pero también con el grado de tolerancia de las autoridades al abuso de ciertos constructores con respecto al aislamiento de los cerramientos. La Figura 5.4 muestra la foto de un panel de plástico reciclado, de PE o PP, en cuyo interior se puede alojar un aislante a granel.

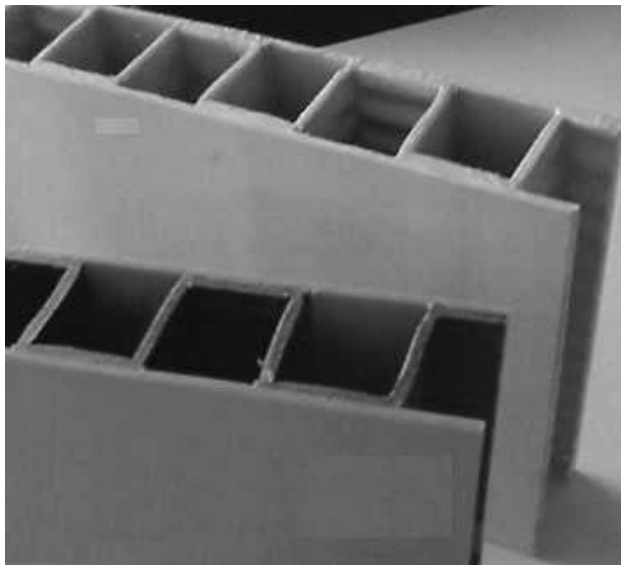


Figura 5.4. Panel de plástico para alojar aislante.

Las formas constructivas de los diferentes materiales de construcción se han ampliado y diversificado en gran manera. La Figura 5.5 muestra un bloque de cerámica: «Poroton S 12», fabricado en Alemania, con una densidad de 800 kg/m^3 y una conductividad térmica muy baja. Obsérvese que el interior está relleno de espuma de poliuretano para mejorar las características aislantes. También hay que añadir que la propia cerámica se ha fabricado a base de añadir material fungible junto a la arcilla, lo que proporciona una microporosidad en el interior de la masa cerámica.

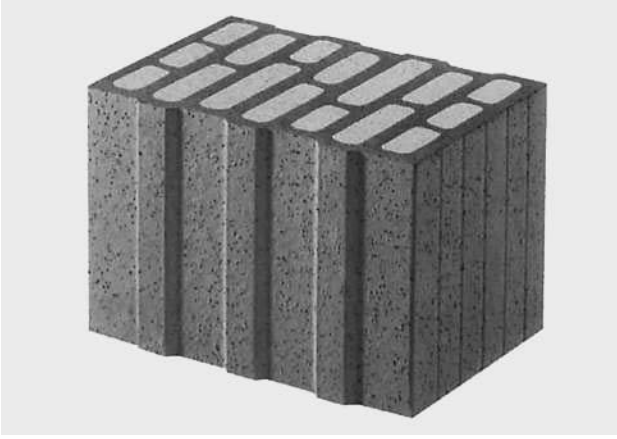


Figura 5.5. Bloque de cerámica con aislamiento incorporado.

En España una vivienda nueva consume el 40% más de energía que una homóloga francesa. Si bien España es un país de clima templado, en particular la costa mediterránea, durante unos cuatro meses al año se precisa calefacción y otros tantos requieren aire acondicionado. Esta zona, en la primera década del siglo XXI, ha llegado a concentrar casi el 40% de la edificación de la UE, circunstancia que merece un análisis más profundo.

Finalmente hay que citar algunas de las estrategias con que las autoridades pretender acometer la concienciación y el ahorro energético en la edificación:

- La certificación energética (Información sobre el comportamiento energético de la vivienda).
- Certificación ambiental de edificios (Pretende otorgar un certificado sobre el comportamiento energético, los materiales usados, el respeto al medio ambiente, etc.).
- Criterios para considerar el planeamiento y la ordenación del suelo.
- Ordenanzas municipales.
- Divulgación de experiencias. Sensibilización ciudadana.
- Medidas de fomento, para popularizar el uso y las ventajas del ahorro de energía, que intenten paliar los sobrecostes.

Con la nueva normativa de Certificación Energética de Edificios, que entrará en vigor a partir de 2006 los nuevos edificios serán clasificados en siete categorías (de la A a la G) en función de su eficiencia en el consumo energético. Se calcula que el ligero incremento de costo se verá compensado por un ahorro de cerca del 60% en electricidad.

Todos estos comentarios hacen pensar que es indispensable introducirse en la arquitectura bioclimática para conseguir una edificación energéticamente sostenible.

En el punto 1 del DVD adjunto se muestra normativa relacionada con eficiencia energética, así como el nuevo código técnico de edificación español.

1.1.1. Edificación energéticamente sostenible

Las ciudades son importantes núcleos emisores de CO_2. El 41% del total de las emisiones se producen en el entorno urbano. Este porcentaje engloba las emisiones debidas al consumo de energía en el sector doméstico y en actividades relacionadas con los edificios de oficinas, comercio, ocio, etc.

La edificación, en su conjunto representa el 42% del consumo de energía en la UE, con un incremento medio del 1,3%. Se trata de un foco muy importante pero difuso, es por ello que, de momento, no está sujeto al Protocolo de Kyoto.

Parece lógico en un país con abundante sol y en la latitud en que se halla España se debería potenciar la fachada al sur y minimizar las restantes (las viviendas aisladas o pareadas obtienen buenos resultados cuando la fachada sur es del orden de 1,5 a 2 veces mayor que la fachada oeste). En parajes donde la calefacción es mucho más perentoria se debería reducir la relación entre la superficie de la fachada y el volumen, de cara a la compactación de los edificios y la minimización de las pérdidas.

Cuando sea posible se recomienda la construcción de elementos salientes cerrados o semicerrados para potenciar o amortiguar el efecto del sol, tal y como esquematiza la Figura 5.6.

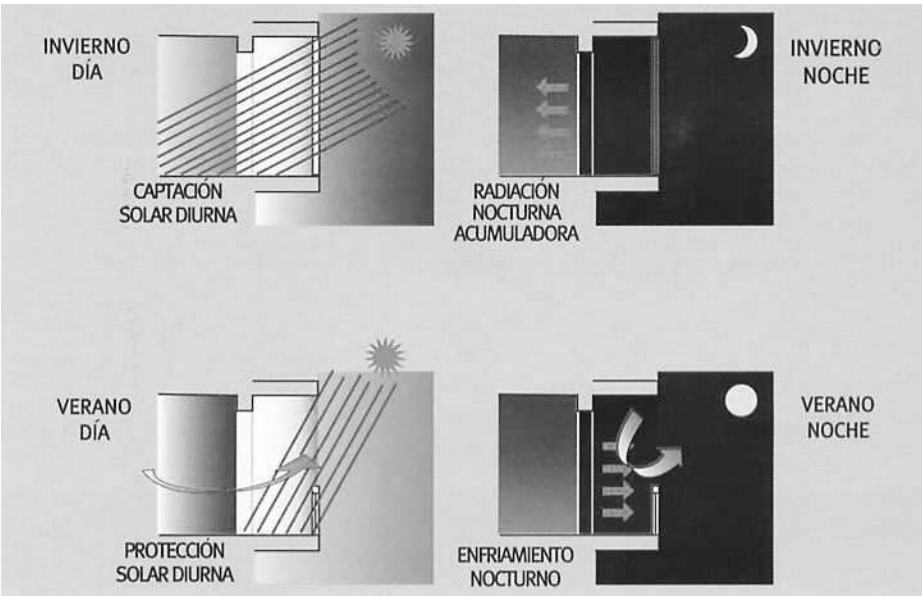


Figura 5.6. Efecto ambiental de los cuerpos salientes, con respecto al sol.

Cerca de Barcelona (en la ciudad de Massal Fassar) se ha realizado un conjunto de viviendas, denominadas el Lliri Blau, que constituye un referente a nivel europeo de construcción respetuosa con el medio ambiente ya que cumplen con los todos los indicadores de sostenibilidad. Gracias al proceso de diseño y de estrategia constructiva, se considera el conjunto 100% sostenible y ecológico.

En las viviendas se han seguido fielmente los indicadores de sostenibilidad, de los que cabe destacar: la utilización de materiales reciclados y reciclables, utilización de materiales que han necesitado la menor energía posible para ser obtenidos, utilización de materiales que han generado la menor cantidad posible de residuos, mano de obra local, materiales naturales, diseñar el edificio para poderse reciclar una vez que se tenga que derribar, que se biodegraden parte o todos sus materiales, etc.

Otro punto clave de la urbanización es el bioclimatismo. Se ha cuidado exhaustivamente la perfecta orientación al sur, la estructura espacial, el diseño arquitectónico, la disposición de cristaleras y canales de ventilación natural, el diseño de espacios intermedios, de tal modo que, tan solo por su diseño arquitectónico, los edificios tienden a calentarse en invierno y a refrescarse en verano sin ningún tipo de sistema mecánico. Para reforzar el comportamiento bioclimático de los edificios se han utilizado muros de carga (de alto aislamiento e inercia térmica), cubiertas ajardinadas, invernaderos, carpinterías con compuertas para permitir el paso del aire y con ello, la ventilación y el acondicionamiento térmico natural del edificio.

Cabe destacar que en estas viviendas se ha conseguido una alta eficiencia energética. Se estima que, debido al nivel de aislamiento, inercia térmica y su componente bioclimático, los edificios consumen alrededor de un 30-40% menos de lo que consumen edificios convencionales de la misma superficie y características. Así mismo, también se ha promovido el uso de energías alternativas. Un claro ejemplo, es el agua caliente sanitaria, que es generada por captadores térmicos con apoyo de acumuladores con tarifa nocturna.

El complejo residencial resalta por su diseño arquitectónico, cualidad bioclimática y sostenibilidad. Se han diseñado nuevos espacios de convivencia, nuevas tipologías de hábitat que incluyen patios a diferentes alturas y diferentes perforaciones que generan microclimas. Estos permiten el acondicionamiento térmico natural, así como la convivencia humana. Los ocupantes de las viviendas pueden elegir entre una intimidad completa y la posibilidad de conectar visualmente con un conjunto reducido de vecinos. Esta arquitectura favorece la comunicación humana, proporciona una escala social y humana, aumentando la calidad de vida del complejo.

Todas las viviendas del complejo van equipadas con sistemas domóticos clasificados en cuatro áreas: la seguridad y dispositivos de alarma, el control del consumo energético mediante programación horaria y control de la temperatura deseada, el control de automatismos, como persianas, riego, cortinas, iluminación, detectores de gas y detectores de inundación, y por último, los sistemas de telecomunicaciones.

En relación a los sistemas domóticos encaminados a conseguir el control del consumo energético, su utilización es relativa ya que si el edificio es bioclimático, tiene alta inercia térmica y está bien aislado, ello ya implica un fuerte ahorro energético, muy superior al que cualquier sistema domótico pudiera proporcionar, y a menor coste.

Con respecto al control de automatismos, se deseó que las viviendas funcionaran correctamente con solo cinco parámetros:

- Control de la calefacción (radiadores eléctricos con una potencia diez veces inferior a la necesaria para cualquier vivienda. La potencia total instalada de los radiadores con tarifa nocturna es de tan solo 1.500 watios por vivienda).
- Control de iluminación de las luminarias de bajo consumo.
- Control de los detectores de inundación.
- Control de las luminarias cercanas a las ventanas (cuando al caer la tarde empieza a haber menos iluminación se van encendiendo gradualmente los diferentes circuitos de alumbrado tan solo de las luminarias mas cercanas a las ventanas).
- Control del riego de cubiertas ajardinadas (con el fin de refrescar en verano).

Los precios de los sistemas de control oscilan entre 900 euros el más sencillo, hasta 3.000 euros el sistema más completo, por supuesto con instalación incluida.

Las viviendas se han vendido al precio de mercado en la zona, que oscila entre los 108.000 €, la más pequeña, hasta los 204.000 € la más cara. Para mantener estos precios ha sido clave el conocimiento y aplicación de las mejores y más económicas tecnologías y materiales de construcción ecológicos, así como la amplia experiencia en el diseño bioclimático, y el diseño especial de los edificios.

El conjunto de ventajas que proporciona la sostenibilidad del grupo de viviendas se resume en:

- Consume tan solo el 40% de la energía que consumen edificios de sus características.
- Sistema de ventilación y refresco natural, a base de ventilación cruzada y canales que obtienen aire de la cara norte, y lo distribuyen por las viviendas.
- Recoge y usa las aguas de lluvia, para el regadío y relleno de las cisternas de los W.C.
- Todos sus materiales son ecológicos 100%, calificados por medio de 40 indicadores sostenibles, identificados para tal fin.
- Los edificios son bioclimáticos, no necesitando aire acondicionado. Están perfectamente orientados Norte-Sur, con un factor de forma perfecto y con poca profundidad para permitir ventilación cruzada. Los edificios, por sí mismos (por su propia estructura y morfología arquitectónica) tienden a refrescarse en verano y a calentarse en invierno.
- Utiliza solo energía solar y eléctrica con tarifa nocturna.

En el punto 2 del DVD adjunto se muestran instalaciones referentes a la domótica.

1.1.2. Buenas prácticas energéticas en la vivienda

El ahorro energético no es una cuestión exclusiva de expertos sino que también es responsabilidad individual. Para ello se dan algunas pautas:

- *Calefacción.* La calefacción constituye uno de los consumos energéticos más importantes. Hay que procurar que la temperatura de consigna no supere los 19 ℃. Por cada grado de exceso los gastos se incrementan aproximadamente en un 8%. Habría que considerar la reducción de la temperatura en lugares o cuartos no habitados o pasillos. Los sensores deben estar lejos de las ventanas y al abrigo de las corrientes de aire o fuera de los rayos solares. Debido a la inercia térmica, en casos de calefacción puntual, ésta debe accionarse antes de la actividad y pararla antes de abandonar la sala. Las superficies de calefacción (radiadores) y filtros de aire deben limpiarse regularmente.
- *Aire acondicionado.* Antes de instalar, o renovar el aire acondicionado se debe actuar sobre la arquitectura del edificio para disminuir las pérdidas y en consecuencia la potencia de refrigeración. Las ventanas deben estar equipadas con toldos. Las paredes, aislantes, deberían estar pintadas de colores reflectantes para devolver la radiación solar. Los condensadores y evaporadores deben estar limpios. La temperatura de consigna debería situarse en 24 ℃ (En el año 2005, el primer ministro japonés recomendó subir el termostato a 27 ℃ y trabajar en mangas de camisa).
- *Aislamiento.* Antes las paredes eran de materiales naturales y gruesas lo que de natural pro-

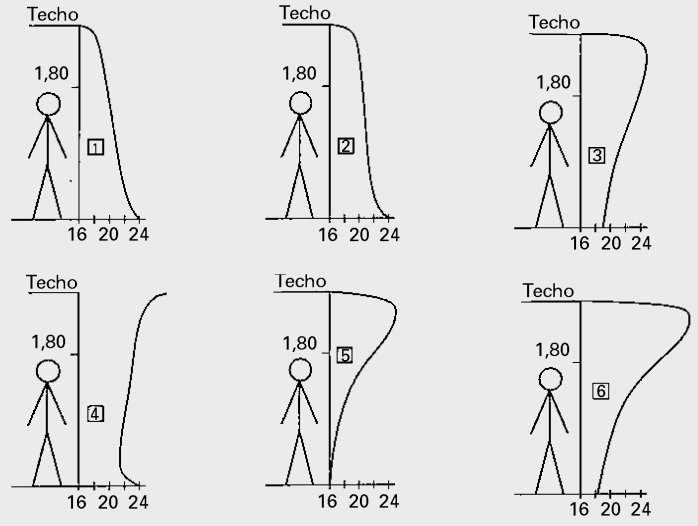
porciona confort. Hoy en día la construcción es diferente y los cerramientos (paredes, ventanas, puertas) deben ser aislantes (Este capítulo se halla, en buena parte dedicado a la conversión de residuos ligeros en materiales de construcción aislantes). El efecto es importante tanto en régimen de verano como de invierno. Las puertas y ventanas que no se utilicen han de estar herméticamente cerradas.

- *Ventilación.* Debido a que el aire interior viciado suele ser el responsable de ciertos problemas: dolores de cabeza, alergias, irritación ocular, etc. (lo que se denomina «síndrome del edificio enfermo»), durante la construcción del edificio se debe integrar cuidadosamente el sistema de ventilación ya que ésta cumple además la misión de refrigeración. En principio la ventilación natural es la más adecuada y debe evitarse la instalación de ventiladores (gasto de energía y ruido). En regiones donde exista una diferencia significativa entre las temperaturas diurnas y nocturnas, la ventilación nocturna es suficiente para refrescar el edificio, si tienen suficiente inercia térmica. Sin embargo, lo habitual es un sistema forzado de ventilación. Una segunda cubierta, apoyada sobre el verdadero tejado, con una cámara de aire permite en verano reducir la transferencia de calor.
- *Iluminación.* En la medida de lo posible se debe usar la iluminación natural que, al margen de ser gratuita es la mejor en cuanto a calidad cromática y confort. Así pues hay que tener esto en cuenta a la hora del diseño del edificio o de elección de la distribución interna. Si hay que emplear iluminación artificial se debe escoger la gama de lámparas de bajo consumo energético.

En el punto 3 del DVD adjunto se muestran instalaciones referentes a fachadas ventiladas e iluminación natural.

El confort estriba en mantener una temperatura gradual y sostenida. Como se ha indicado, la calefacción es el factor que supone mayor gasto por ello la Figura 5.7 muestra las diferentes perfiles de temperatura que se consiguen obtener en función del sistema de calefacción elegido.

Como indica la Figura 5.7 la calefacción ideal corresponde a la modalidad 1 que en la práctica corresponde al suelo radiante. Los primeros vestigios de calefacción radiante se remontan a la civilización romana, siglo I a.C. en Anatolia (Turquía). En Castilla-León (España) existen muchas viviendas equipadas con «gloria», estancia calentada por el suelo gracias al establo que se halla situado debajo, un concepto equivalente al «hypocausto» romano.



1. Calefacción ideal.
2. Suelo radiante.
3. Radiaciones en pared exterior.
4. Techo radiante.
5. Radiadores en pared interior.
6. Aire caliente.

Figura 5.7. Perfil de temperaturas en altura según modelo de calefacción.

1.1.3. El consumo energético en la edificación

Referirse a la arquitectura bioclimática, equivale a estudiar la mejor eficiencia energética y ello sería equivalente a emplear el término de edificios de bajo consumo energético.

Dado que el consumo de energía supone una degradación del medio ambiente, se debe tender a la construcción de edificios que consuman menos energía. En nuestro país, de clima mediterráneo y templado, el sector terciario consume el 33% de la energía final, lo cual implica a la edificación como uno de los principales responsables del consumo energético.

Es obvio que el mejor sistema para ahorrar energía en los edificios es el aislamiento térmico. No obstante el espesor, y la calidad, del aislante deben ser bien calculados. Hoy en día todas las legislaciones obligan a la construcción de los cerramientos con el correspondiente aislamiento. Una vez elegida una determinada calidad de aislante térmico la pregunta inmediata es: ¿Qué cantidad, espesor de aislante es el adecuado? No es fácil responder sin hacer una serie de cálculos, pero el sentido común impone un límite lógico: a medida que se aumente la capa de aislante las pérdidas de calor en los cerramientos decrece de manera asintótica. Por otro lado el coste energético de fabricar el aislante aumenta de forma proporcional al espesor. De esta manera el espesor óptimo del aislante sería aquel en que el mínimo de pérdidas de calor a través de las paredes (o el máximo de ahorro energético), en términos de energía, coincide con el máximo de energía precisa para fabricar el aislante.

Otro parámetro interesante para evaluar la calidad del tipo de aislamiento térmico a elegir consiste en la valoración del Análisis del Ciclo de Vida (ACV) sobre los diversos tipos de aislantes térmicos disponibles en el mercado.

Existen una serie de estrategias para conseguir que un edificio consuma menos energía, aunque debe procurarse que sus efectos no ejerzan acciones contrapuestas. Estas estrategias pueden sintetizarse en:

Estrategia conservativa: Consiste en dotar de aislamiento térmico a las paredes. A medida que las paredes están mejor aisladas la aportación de calor exterior (solar) es menor. En otras palabras estriba en equipar al edificio de un grado de aislamiento térmico que permita alcanzar el confort térmico, dificultando la entrada de calor en verano y evitando su disipación en invierno.

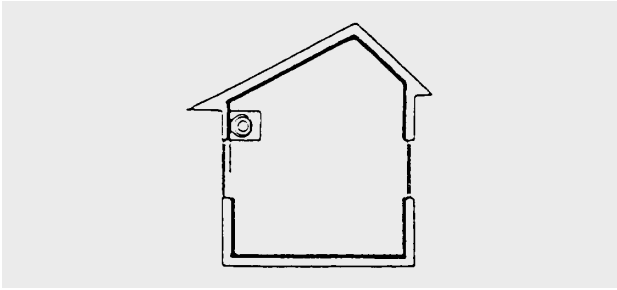


Figura 5.8. Estrategia conservativa.

Estrategia de captación solar: Se basa esencialmente en realizar diseños que aprovechen los aspectos favorables del efecto invernadero. Sin embargo, ello puede conducir a sobrecalentamientos no deseados.

Esta estrategia es muy usada en países fríos. En frente de ventanales donde incide la radiación solar se instalan muros, de hecho son paredes del propio edificio, con una alta densidad para que sea capaz de acumular mucho calor. Este calor va siendo disipado durante las horas nocturnas y ahorra calefacción.

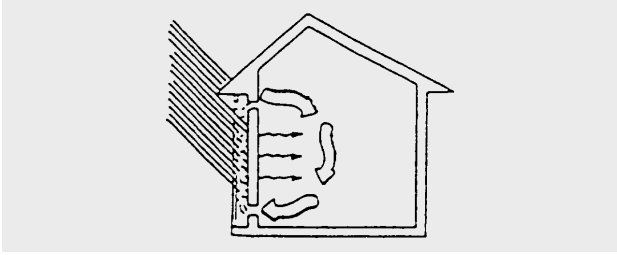


Figura 5.9. Estrategia de captación solar.

Estrategia de refrigeración natural: Hay que prever unos sistemas que permitan disipar el calor sobrante en periodos de exceso de radiación. Esta estrategia debe ser compatible con las anteriores. Ejemplos a seguir son: la ventilación natural, la inercia térmica del propio edificio o la creación de zonas de sombra artificiales.

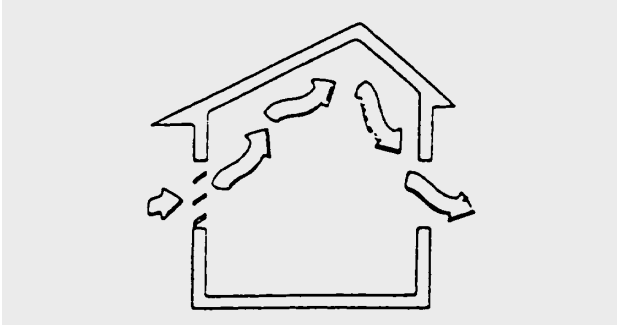


Figura 5.10. Estrategia de refrigeración natural.

Estrategia de iluminación natural: Se debe fomentar la entrada de luz natural sin menoscabo del aislamiento térmico.

La iluminación natural ahorra energía en doble sentido. Por una parte la luz natural evita la artificial y, por tanto, ahorra energía eléctrica. Pero otro efecto perseguido es el calentamiento que proporciona la propia radiación solar. Sin embargo, esto es una arma de doble filo puesto que durante las horas nocturnas las grandes aberturas provocarán pérdidas de calor muy importantes. Para paliar este problema se han desarrollado los denominados aislantes opacos que permiten la entrada de la luz pero impiden la salida de la radiación infrarroja, con lo cual se atenúan, en gran modo, las pérdidas de calor a través de estos aislantes. Es decir, hace las veces de efecto invernadero local.

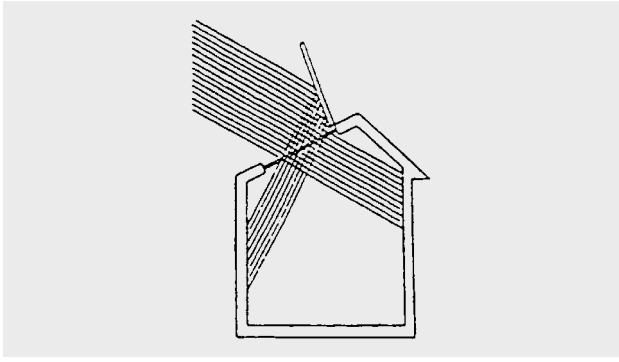


Figura 5.11. Estrategia de iluminación natural.

Sistemas de cerramientos fotovoltáicos: La instalación de paneles fotovoltáicos en los tejados han ido abandonándose por motivos, esencialmente, estéticos. Sin embargo nadie duda de su efectividad, por ello en los últimos años los fabricantes de cerámica han ido incorporando a sus fabricados minipaneles fotovoltáicos (En el capítulo destinado a la vitrificación se explica que la naturaleza de la cerámica y los paneles fotovoltáicos son muy próximos). Estos se hallan insertos en el material cerámico y sólo es preciso llevar a cabo el conexionado eléctrico entre ellos.

Los primeros ensayos fueron la aplicación de minipaneles entre los cerramientos de los edificios. Un ejemplo de ello es la biblioteca pública de Mataró (Barcelona), donde los paneles fotovolt.aicos insertos en las paredes generan electricidad para el propio edificio, las necesidades en horas nocturnas se solventan por medio de un sistema de baterías, y exporta los sobrantes a la red eléctrica nacional. La Figura 5.12 muestra una foto del edificio Isofotón

Figura 5.12. Edificio Isofotón en Málaga.

dedicada a la fabricación de paneles fotovoltáicos integrados.

En el punto 4 del DVD adjunto se muestran diversas instalaciones y sistemas de iluminación natural.

Un avance en este sentido ha sido la incorporación de minipaneles a tejas. Por su situación las tejas obtienen una mejor insolación y, por tanto, una superior producción de electricidad. La adaptación a la teja es perfecta, se minimiza la reflexión y la integración de color está muy lograda. Además son resistentes a las inclemencias atmosféricas y permite el paso, por encima, para los trabajos de mantenimiento.

En la actualidad la instalación de 50 m^2 de tejas de este tipo logra generar 3,6 kW, energía que, en función del clima y la orientación, permite subvenir los dos tercios del consumo eléctrico de una vivienda.

1.1.3.1. Medidas de ahorro de energía

En un clima como el español y en particular el de la zona mediterránea, el uso de la energía solar térmica puede llegar a cubrir hasta un 60% de las necesidades de consumo de agua caliente de una familia media, con unos niveles de confort y calidad de vida perfectamente compatibles con los estándares actuales. En la actualidad este tipo de instalaciones están sobradamente contrastadas y perfeccionadas y, por tanto sería de esperar que se potenciara su uso.

El Instituto para la Diversificación y el Ahorro de la Energía (IDAE) ha elaborado una «Propuesta de Modelo de Ordenanza Municipal: Captación Solar para Usos Térmicos, (véase http://www.idae.es/pcii/

doc/Completo.pdf) por la que pretende que los gobiernos municipales que así lo deseen tomen esta propuesta como base para desarrollar su propia ordenanza municipal sobre energía solar térmica. Dicho modelo toma como principal referencia las ordenanzas de captación solar promulgadas por los ayuntamientos de Sant Joan Despí y Barcelona.

En el punto 5 del DVD adjunto se muestran ejemplos de instalaciones de paneles solares térmicos.

Las medidas de ahorro energético que propugnan las administraciones suelen diferenciarse entre los edificios existentes y los de nueva planta. En el primer caso las medidas afectan a la envolvente edificatoria, a las instalaciones térmicas y a la iluminación, mientras que las recogidas en el segundo bloque responden fundamentalmente a las nuevas directrices que marca la Directiva 2002/91/CEE so*bre Eficiencia Energética en Edificios*. Para dar una idea de la magnitud de las cifras, en el caso de España, se estima en 1.800 millones de m^2 la superficie correspondiente a fachadas, cubiertas y cerramientos.

1.1.4. «Distric heating»

El *distric heating*, o calefacción de barrio, es un ejemplo que aúna el aprovechamiento energético de residuos combustibles con la calefacción doméstica.

El sistema se inicia con una cogeneración, que puede ser de gas en motores de cogeneración o en una central de combustión de biomasa.

Cogeneración con gas natural, de cara a la sostenibilidad su aplicación está justificada cuando se requiera una cierta demanda eléctrica, por ejemplo en un polígono industrial, y la energía térmica generada no tenga aplicación en el propio polígono. En este caso los gases de escape se hacen pasar por un intercambiador de calor que calienta agua en circuito cerrado. Esta agua es conducida a todas las viviendas para alimentar el sistema de calefacción central. De esta manera se aprovecha, en forma eléctrica, un 40% de la energía del combustible y, en forma de agua caliente, otro 30-40%, con lo que la tasa de aprovechamiento total es muy elevada.

Sin embargo no hay que olvidar que el gas natural es un combustible fósil y, en consecuencia, aumentará el efecto invernadero. En estos casos lo más aconsejable es usar biomasa, se gasifica y el gas de síntesis obtenido, una vez acondicionado, se introduce en un motor de cogeneración. Si bien el rendimiento es algo inferior, económicamente y ecológicamente el sistema es ventajoso.

Cogeneración con biomasa, el sistema más moderno es la gasificación de la biomasa antes explicada o bien el sistema tradicional de incineración de biomasa. En este método el combustible se alimenta, debidamente troceado, a un horno. Los gases de combustión pasan a una caldera de vapor. Éste acciona una turbina de vapor que arrastra un alternador que produce electricidad. El vapor de baja que sale de la turbina se conduce a un intercambiador que calienta el agua destinada a calefacción.

De esta manera funciona la calefacción de innumerables pueblos de centro y norte de Europa usando los residuos agrícolas y/o forestales como combustible.

En el punto 6 del DVD adjunto se muestra un ejemplo de instalación de «distric heating».

1.2. TRANSFERENCIA DE CALOR

El calor se representa como una transferencia de energía entre materiales como consecuencia de una diferencia de temperaturas. Si no existiera ningún impedimento a este flujo al cabo de un cierto tiempo los materiales igualarían su temperatura y cesaría así el flujo de energía.

El aislamiento térmico en la construcción persigue dificultar esta transferencia de energía entre el exterior y el interior de un habitáculo. De esta forma se pretende independizar en lo posible la temperatura interior de la exterior.

La transmisión de calor se desglosa, a efectos de análisis, en tres componentes:

- *Conducción*: Es el método de transmisión de calor por excelencia sobre un soporte sólido. El calor se manifiesta como energía de rotación y vibración de las moléculas. Esta excitación se propaga molécula a molécula a través de la fase sólida.
- *Convección*: A diferencia de los sólidos, en los fluidos las moléculas no están fuertemente unidas entre sí. La excitación se traduce en un incremento de la cantidad de movimiento de las mismas.
- *Radiación*: Toda materia a temperatura diferente al cero absoluto emite y absorbe energía en forma de ondas electromagnéticas. Es el único mecanismo que permite propagar la energía a través del vacío.

Los materiales aislantes obtenidos a partir de la ceramización de residuos son obviamente sólidos. Ello podría inducir a pensar que la conducción es el único mecanismo por el que se transmite el calor a través de ellos. Debido a la naturaleza de los materiales ello no es exactamente así, sino que también actúan los otros dos mecanismos.

Por el interior de los sólidos el calor se transmite esencialmente por conducción (λ'). Así en teoría, y suponiendo que un cuerpo no contuviese ningún tipo de poro en su interior, la conductividad de un sólido sólo dependería de la naturaleza intrínseca de la materia que constituyera dicho sólido (por ejemplo, un sólido de cobre transmite el calor mucho mejor que uno, equivalente en geometría y condiciones de contorno, de vidrio). La realidad es distinta y todos los materiales en mayor o menor medida son porosos y además contienen grietas.

La porosidad cerrada es la causa de un aumento en la capacidad de aislamiento térmico de los materiales. Así pues habrá que estudiar la influencia de la cantidad, calidad y distribución de la porosidad en el comportamiento térmico de un material.

Los poros se hallan llenos de gas, luego cuando la pared del poro se calienta también lo hace el gas ocluido y se engendra una convección (λ'') natural en el interior del poro que transmite el calor al otro extremo de la pared del poro.

Paralelamente la radiación térmica calienta la cara opuesta del poro debiéndose considerar un coeficiente de transmisión de calor por radiación (λ''').

La conductividad térmica de un sólido es la suma de los tres factores indicados ya que, en realidad, el calor se transmite simultáneamente por conducción, convección y radiación. Como indica la Figura 5.13, el calor se transmite por conducción (λ') pero cuando llega al borde del poro el flujo se interrumpe. Ahora debe calentar un gas ocluido en el poro. Cuando este se caliente comenzará una convección natural (λ'') que transferirá el calor hasta el otro extremo del poro. Esta modalidad es menos eficaz que la anterior forma de transmisión de calor. De hecho, a temperatura ambiente, cuanto mayor sea el diámetro del poro, tanto peor será la transmisión de calor, o lo que es lo mismo: tanto más aislante será. Paralelamente la pared caliente del poro envía por radiación (λ''') el calor a la parte opuesta. Esta transmisión es muy rápida pero de muy baja intensidad a baja temperatura. Como es lógico para la confección de un material aislante a baja temperatura se elegirá:

- Un material poco conductor, como puede ser cualquier material cerámico.
- La máxima formación de porosidad en su interior y, además de gran diámetro.

Es evidente que para el caso de materiales conductores, metales, la conductividad λ' por conducción será mucho más elevada en comparación a las otras dos (entre otras razones por tratarse de materiales densos y compactos con poca porosidad).

1.2.1. Densidad y comportamiento térmico

La ausencia de porosidad supone un incremento de densidad y, casi siempre, de conductividad térmica. Esto queda patente en la Figura 5.14.

En función del tipo de material que se desee fabricar será preciso alterar la densidad del material a base de modificar su infraestructura. Si lo que se pretende es fabricar un material aislante lo fundamental es que haya una porosidad cerrada muy importante. Por el contrario, si se dispone de un residuo denso, lo más apropiado será fabricar un material denso, en este caso la densidad será alta, y como consecuencia de la ausencia de porosidad, la conductividad será elevada.

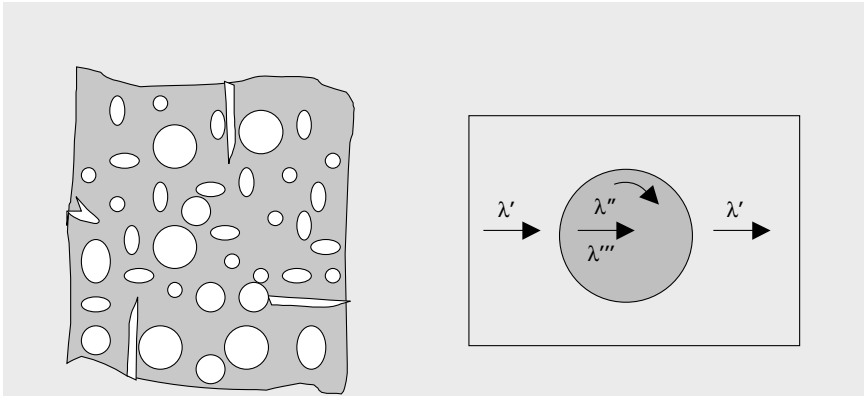


Figura 5.13. Mecanismos de transmisión de calor en el interior de los poros.

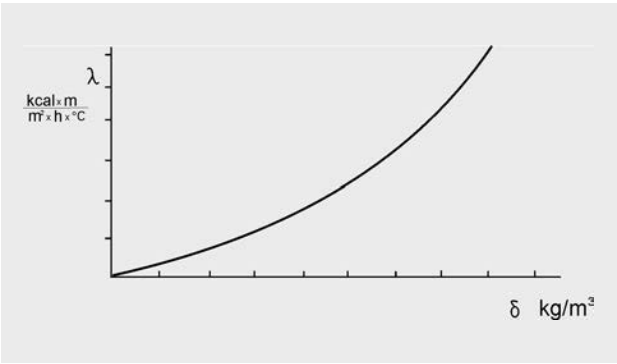


Figura 5.14. Conductividad térmica vs densidad.

En el mundo de los materiales de construcción, en particular los cerámicos y hormigones, hay una tendencia a identificar la calidad con la resistencia mecánica. Esta propiedad será imprescindible allí donde se deba absorber una solicitación estructural y ello va ligado a un material denso. Sin embargo, en la mayoría de los casos, el cerramiento no ha de soportar otra carga que su peso propio y, en este caso, no tiene sentido que el material sea resistente mecánicamente, lo que implica una alta densidad y peso, sino aislante para mejorar la calidad de vida y reducir el peso muerto de la edificación. Ello permite aligerar la estructura portante del edificio.

Como corolario se puede decir que la resistencia mecánica y la capacidad de aislamiento térmico, son propiedades físicas contrapuestas.

Es difícil señalar donde está la frontera entre materiales ligeros y densos. Una buena pauta es utilizar el valor 1 (kg/dm^3) como elemento diferenciador. Si la densidad es inferior a este valor el material será aislante o bien denso si supera esta cifra.

El histograma de la Figura 5.15 expone la correlación entre densidad y conductividad térmica para algunos materiales y residuos. En líneas generales a mayor densidad mayor conductividad térmica.

La explicación parece obvia. Una mayor densidad supone una reducción de la porosidad y ello conlleva una mayor conductividad térmica.

La principal propiedad que se requiere a un buen aislante es la homogeneidad que se traduce en una baja conductividad térmica. La conductividad es una propiedad característica de cada material, su valor depende de la temperatura de servicio, densidad, porosidad: cantidad de poros y tamaño de los mismos, contenido de humedad, etc. La Tabla 5.1 muestra diversos valores de la conductividad en función de la temperatura y su densidad aparente.

En el punto 7 del DVD adjunto se muestra una imagen de diatomeas.

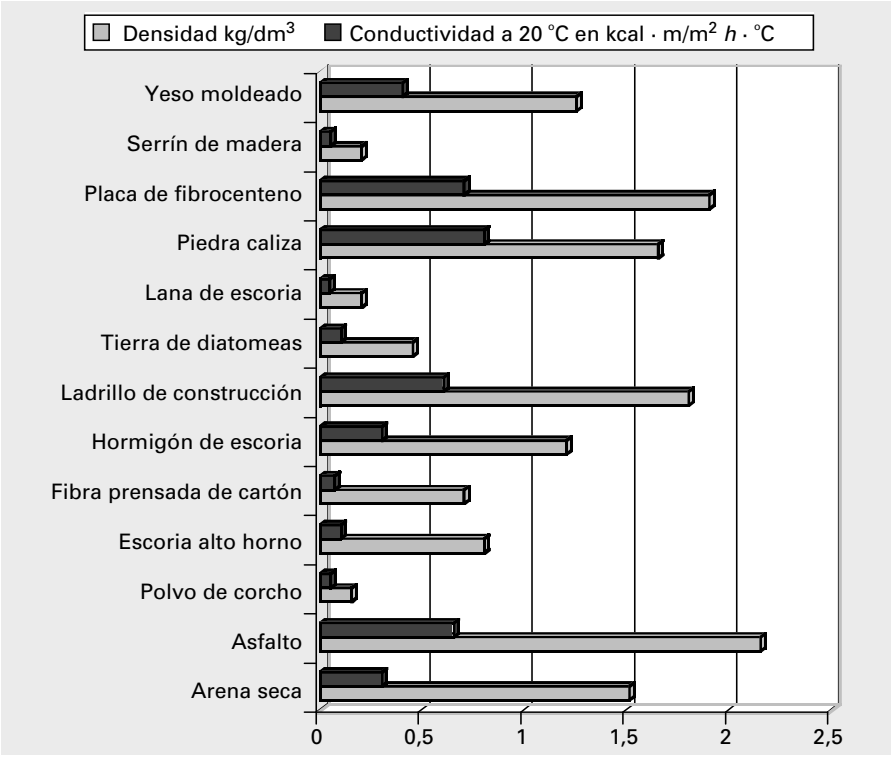


Figura 5.15. Conductividad y densidad de algunos residuos

Tabla 5.1. Conductividad térmica y densidad de algunos materiales

Material	°C	λ	d (kg/m³)
Cobre	0	331	8.938
Acero Inox 18/8	0	12,8	7.816
Ladrillo común	20	1,12	2.050
Ladrillo refractario Al_2O_3	800	1,17	2.322
Ladrillo de CSi	1.400	9,5	3.050
Ladrillo de diatomeas	200	0,26	800
Hormigón Portland	20	1,2	2.300
Vidrio común	20	0,65	2.700
Fibra de vidrio	38	0,04	200

Nota: Los valores de la conductividad están expresados en kcal · m/m² · *h* · °C (Para pasar a unidades internacionales W/m · °C, hay que multiplicar por 1,16).

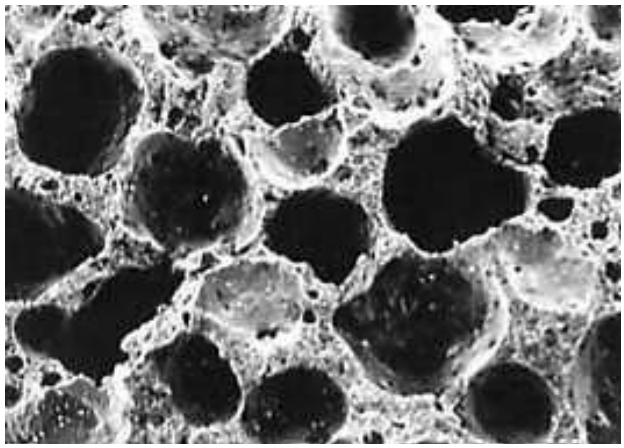


Figura 5.16. Poros de un material aislante térmico.

Como muestra la tabla precedente el ladrillo común tienen una conductividad térmica elevada, de hecho se le debería denominar conductor del calor. Sin embargo, cuando se le introduce una sustancia orgánica que desaparezca con la temperatura de cocción, la porosidad aparecida a partir de la destrucción de la materia orgánica lo convierte en un material aislante. La Figura 5.16 reproduce la estructura típica de los poros de un aislante.

1.2.2. Conductividad térmica de algunos residuos

La Figura 5.17 muestra la conductividad térmica de algunos residuos usados como aislantes y su comportamiento con la temperatura.

Es curioso observar que el valor de la conductividad térmica del asbesto es la mayor de todos ellos. Tradicionalmente se han venido empleando los materiales fabricados a partir de las fibras de asbesto como aislantes, si bien la propiedad más destacada de ellos es su característica de producto ignífugo. Habiéndose descubierto desde hace años su relación directa con el desarrollo del cáncer de pulmón, muchos países lo han prohibido de forma tajante.

Además comporta otro problema de higiene y medio ambiente. La sustitución, o derribo, de edificaciones en las que se había usado el asbesto como elemento aislante es una operación muy delicada ya que el derribo provoca polvo, de asbesto en este caso, generándose con ello un riesgo importante para la salud puesto que la inhalación del polvo es el causante directo de la enfermedad.

1.2.3. Concepto de aislamiento térmico

Se dice que una pared, o pared compuesta, se comporta como aislante térmico cuando dificulta el paso de calor a su través o bien cuando las pérdidas de calor son mínimas.

Los resultados de los cálculos se refieren siempre al régimen estacionario de transmisión de calor. O sea, cuando la distribución de temperaturas en el interior de las distintas capas se ha estabilizado.

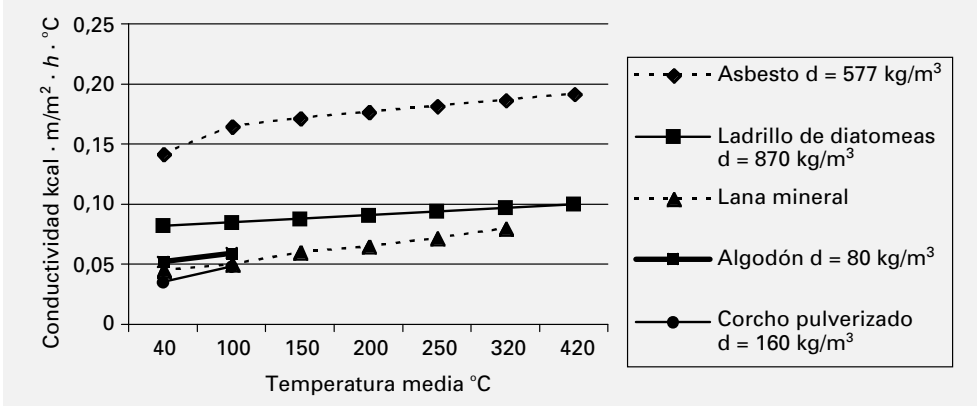


Figura 5.17. Conductividad de algunos materiales con la temperatura.

En el ejemplo de la Figura 5.18, los datos de la pared compuesta son los que se especifican en la Tabla 5.2.

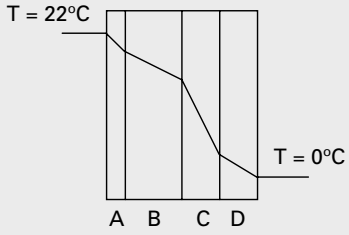


Figura 5.18. Gradiente térmico en una pared compuesta.

Tabla 5.2. Características de las capas de una pared

	Capa	Espesor *e* en cm	Conductividad λ en kcal · m/m² · *h* · °C
A	Enlucido	1	0,8
B	Bloque perforado	20	1,3
C	Aislante	10	0,2
D	Ladrillo macizo	14	5,2

El valor de *k*, (coeficiente integral de transmisión de calor), especificado en la mayoría de tratados de edificación o normas de vivienda, depende del espesor de cada capa (*e* en *m*) y de su conductividad térmica λ (en Kcal · m/m² · *h* · ℃), de acuerdo con la expresión:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{e_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} = 1{,}15 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2\ h\ ^\circ\text{C}}$$

Las pérdidas de calor a través de una pared se calculan una vez conocidas la superficie (*S* en m²) de pared expuesta al flujo térmico, el salto térmico (Δt en ℃) y el coeficiente global de transmisión del calor *k*. Así, siguiendo con el ejemplo anterior, para un salto térmico de 22 ℃ dichas pérdidas serán:

$$Q = k \cdot S \cdot \Delta t = 1{,}15 \cdot 1 \cdot 22 = 25{,}3 \text{ kcal/m}^2 \cdot h$$

El ejemplo muestra que una vivienda fabricada con una pared compuesta que suponga un coeficiente global de transmisión de calor *k* de 1,15 puede dar lugar, en climas rigurosos, a elevadas pérdidas de calor.

En el punto 8 del DVD adjunto y relacionado con importancia del aislamiento térmico se muestra un ejercicio interactivo donde introduciendo temperaturas internas y externas, espesores y clases de materiales se puede calcular directamente las pérdidas de calor, la acumulación de calor y el peso de la pared por unidad de superficie.

1.2.4. Propiedades de los materiales aislantes

Para disminuir el flujo de calor, es decir fabricar un aislante se pueden seguir diversas estrategias de acuerdo con las leyes de la física:

- *Reduciendo la convección exterior.* Disminuyendo el grado de rugosidad de la superficie del aislante, con objeto de reducir las turbulencias. Una estrategia consiste en proteger el aislante con pintura o una capa metálica lisa.
- *En la radiación.* Empleando materiales (superficies) de baja emisividad. Usar un recubrimiento superficial reflectante, como vidrios especiales que vistos desde fuera perecen espejos. Incluyendo en la composición del aislante microplacas o micropartículas de alto poder reflectante.
- *En la conducción.* Se basa en conseguir muchos poros que contienen aire que, a su vez, es muy aislante (en algunos aislantes en los poros se introduce un gas con conductividad muy inferior al aire). En aislantes muy ligeros el gas puede ocupar hasta el 95% del volumen. Evitando comprimir las capas (así los hormigones aislantes proyectados no se suelen vibrar). Evitando la humedad y la entrada de agua en los poros.

Cuando se fabrica un aislante a partir de residuos, el material fabricado ha de tener, obviamente, las mismas características que un aislante convencional, es decir:

- Baja conductividad térmica.
- Reducida higroscopidad. Si el material absorbe humedad los poros se llenan de agua y la conductividad aparente aumenta mucho.
- Adecuada resistencia estructural. Es obvio que los poros no tienen resistencia mecánica, por ello habrá que buscar un equilibrio entre el aislamiento (cantidad y numero de poros) y la resistencia.
- Bajo coeficiente de dilatación. Una dilatación alta se traduce a la larga en una inestabilidad mecánica de la estructura.
- Resistencia al ataque de los compuestos químicos y también al ataque de roedores y microorganismos.
- Resistencia a la llama. Aislante los hay de muchas categorías. Esta característica se refiere a los aislantes de alta temperatura. Para los de baja temperatura, generalmente de naturaleza orgánica, se requiere que los gases y vapores producto de la combustión no sean tóxicos.

1.2.5. Clasificación de los materiales aislantes

Los materiales aislantes no son, en su inmensa mayoría, refractarios, y a grandes líneas se pueden dividir en tres grandes grupos:

- Materiales naturales, como la vermiculita, la diatomea o la madera.
- Materiales artificiales inorgánicos, como la fibra de vidrio o los ladrillos aislantes.
- Materiales artificiales orgánicos, como el plástico.

Todos ellos se distinguen por que el coeficiente de conductividad térmica es muy reducido, por lo general inferior a 1 kcal $\cdot$ m/m^2 $\cdot$ *h* $\cdot$ ℃, el peso específico oscila entre 100 y 900 kg/m^3 y una temperatura de servicio que, en función del material, varia entre menos de 100 ℃ y 1.000 ℃.

1.2.5.1. Materiales aislantes naturales

La más abundante es la harina fósil (trípoli) que son los esqueletos de diatomeas y otros microorganismos. La composición contiene SiO_2 en cantidades que varían del 85 al 90%, el resto suele ser mineral de arcilla o cenizas volcánicas. En otros lugares a estas harinas se las denomina kiesselghur, tierras de radiolarios, etc. La densidad oscila de 450 a 1.000 kg/m^3 y la temperatura de empleo máxima es de 900 ℃.

La perlita es una roca volcánica vítrea que sometida a calentamiento rápido hasta 1.000 ℃ sufre una gran expansión que puede multiplicar por 10 su volumen por lo que la densidad aparente pasa de 2.300 a 100-500 kg/m^3. La temperatura máxima de empleo esta en 850℃.

En el punto 9 del DVD adjunto se muestran ejemplos de materiales aislantes.

La vermiculita es un silicato exfoliado hidratado de aluminio y magnesio. Al ser calentado pierde el agua de constitución de forma irreversible y sufre una expansión entre 12 y 18 veces su volumen inicial. El peso específico obtenido oscila de 100 a 300 kg/m^3 y la temperatura de empleo máxima es de 1.000 ℃.

Si bien todos estos materiales se pueden emplear a granel, las pequeñas vibraciones compactan el material y acaban por perder sus propiedades, por lo que es aconsejable emplearlas como árido para la fabricación de hormigones ligeros. La harina fósil que por su cantidad de arcilla tiene plasticidad suficiente se puede extruir y permite fabricar ladrillos que se cuecen y se venden como aislantes de «segunda cara», para la fabricación de paredes de hornos o, simplemente como material aislante a intercalar entre la pared exterior y el acabado interior.

Los polvos de minerales, como la dolomía, la magnesita o el cuarzo, finamente triturados tienen un coeficiente de conductividad muy bajo y una refractariedad alta, por lo que pueden emplearse como aislantes de alta temperatura.

Finalmente como material natural hay que citar el corcho que con una densidad aparente entre 150 y 250 kg/m^3, es un magnifico aislante para bajas temperaturas.

1.2.5.2. Materiales aislantes artificiales inorgánicos

En la actualidad se fabrican una infinidad de ladrillos aislantes ya sea para «primera capa o fuego», son los denominados refractarios aislantes o, simplemente aislantes o de «segunda cara». Para su fabricación se parte de arcillas caolínitas que se mezclan con un producto que en cocción desaparece y en su lugar aparece una porosidad, por lo general abundante y de pequeño tamaño. Los sistemas para lograr la porosidad son:

- Incorporación a la masa de materiales combustibles, desde el carbón a la leña, pasando por toda clase de residuos (Un ejemplo de ello es el Ecobric®, que emplea fangos de depuradora). Con este sistema es fácil calcular el tamaño del poro, sin embargo se producen fisuras que reducen la resistencia mecánica.
- Incorporación de materiales sublimables, como la naftalina o los plásticos. Como que la pirólisis del producto se realiza a baja temperatura, la distribución de tamaños de poro es fácilmente controlable.
- Introducción de gas. El sistema consiste en mezclar, junto a la arcilla refractaria, una masa capaz de adsorber una gran cantidad de aire. Durante la cocción el aire queda ocluido y genera gran porosidad. El sistema es caro y tan solo se emplea para refractarios de alta gama. Una variante del sistema consiste en introducir un producto químico que durante la cocción genere gases.

En este apartado es preciso comentar las fibras usadas como aislantes de baja temperatura que son:

- *Fibra de vidrio*. Material en forma de fibras, obtenido a partir de vidrio por centrifugación, soplado o estirado. Es muy homogéneo. El coeficiente de conductividad térmica es tan bajo como 0,02 kcal · m/m^2 · *h* · ℃, lo que la convierte en uno de los mejores aislantes y extremadamente ligera ya que algunas variedades parten de 40 kg/m^3. Se expende en gran variedad de formas: mantas, paneles, planchas, fieltros, paneles forrados y a granel. La temperatura máxima de empleo esta sobre los 400 ℃, siempre en segunda cara.
- *Fibra mineral*, también denominada lana de roca. La fabricación es idéntica a la anterior pero ahora la materia prima es basalto (o/y otros minerales), por lo que la temperatura de empleo, también en segunda cara (es atacada por los ácidos), tiene un límite en 700 ℃. La densidad es algo superior a la fibra de vidrio y la conductividad térmica semejante a ella.
- *La arcilla expandida*, son esferas de arcilla que al contener un expansor, que pueden ser residuos, la temperatura de cocción los expande. La densidad es del orden de 600 a 900 kg/m^3. Con ella se pueden hacer rellenos a granel o usarla como árido para hormigones semi ligeros.
- *Silicato cálcico*. Se trata de un aislante que puede trabajar hasta 1.050 ℃, con muy buena resistencia mecánica (13 kg/cm^2) y una densidad entre 180 a 280 kg/m^3. La conductividad térmica es del orden de 0,085 kcal · m/m^2 · *h* · ℃ a 500 ℃. La conductividad térmica es 0,15 kcal · m/m^2 · *h* · ℃ a 900 ℃.

Otro material que merece un apartado especial es el carbono y sus derivados. Las principales características de estos minerales son:

- Es muy refractario. Se volatiliza, sin fundir, sobre los 3.800 ℃.
- Es indiferente a los choques térmicos.
- Mantiene sus prestaciones mecánicas, al menos hasta 2.500 ℃.
- Es el más ligero de los materiales refractarios.
- También es conductor eléctrico, de ahí que se emplee para la fabricación de electrodos.
- Se puede usar como ladrillo o material sin conformar.

En la naturaleza el carbono natural, o artificial, existe en tres variedades: diamante, grafito y las clases amorfas. Industrialmente la de mayor interés es el grafito. Como principal inconveniente hay que citar la oxidación que comienza a 600 ℃ para las variedades amorfas y 750 ℃ para el grafito.

Para la fabricación de los refractarios de carbono se emplean coques, antracitas calcinadas o grafitos naturales. En el proceso de fabricación, una vez triturado y conformado, cocerlo a 1.000 ℃ en atmósfera reductora.

1.2.5.3. Materiales aislantes artificiales orgánicos

En su mayor parte son materiales fabricados a base de plásticos que en su interior contienen un elemento expansor. Debido a su naturaleza tienen un claro límite de empleo, alrededor de 130 ℃ según el tipo y siempre en segunda cara. Los más usuales son:

- *Poliestireno expandido*. La densidad oscila entre 18 a 200 kg/m^3 y la temperatura continuada de uso ha de ser de 80 ℃. Hay otros plásticos celulares que soportan mayores temperaturas.
- *Espumas de resina de goma o caucho celular*. Fabricada a partir de polvo de caucho en cuyo interior hay pequeñas cavidades o poros. El límite de utilización esta en 60 ℃.

1.2.6. Noción de aislante y refractario

Como se ha indicado, se denomina material aislante a aquel que ofrece una gran resistencia al flujo calorífico a su través, mientras que un material refractario es aquél que mantiene sus propiedades mecánicas a elevadas temperaturas.

Así pues las misiones de uno y otro están bien delimitadas en lo concerniente a su aplicación no así en lo que hace referencia a su poder de aislamiento térmico, ya que algunos refractarios son parcialmente aislantes. De hecho el valor del coeficiente de transmisión del calor *k* marca la frontera entre unos y otros.

El coeficiente de transmisión total se define como la inversa de la suma de las capacidades de transmisión de calor de cada una de las paredes que componen el conjunto, considerando las capas límites de uno y otro extremo como paredes. La ex-

presión genérica del coeficiente de transmisión total del calor es:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{e_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

Es difícil establecer en valor absoluto de *k* a partir del cual una pared es aislante o no. El hecho de cambiar la composición o invertir el orden de las capas que componen la pared modifica sustancialmente el valor de *k*. Cuando menor sea *k* más aislante será la pared.

La inclusión de residuos para la fabricación de materiales con determinadas propiedades térmicas halla un buen campo de acción en la fabricación de materiales aislantes. Los materiales refractarios suelen tener una microestructura con muy poca fase vítrea y ello puede ser una barrera para el uso de determinados materiales residuales, no así para la confección de materiales acumuladores de calor que, por el valor de *k*, se asemejan más a los materiales refractarios.

En términos de materiales de construcción convencionales no tiene mucho sentido hablar de refractariedad. Textualmente significa mantenimiento de propiedades mecánicas a elevada temperatura, más o menos a la temperatura a la que han cerami-zado para el caso de los materiales cerámicos, o más de 1.000 ℃ en el caso de los hormigones, en función del diseño y aplicación. Es obvio que ningún material de construcción empleado en obra civil habrá de trabajar a tales temperaturas. De ahí que para los materiales de construcción, que siempre funcionan a temperatura ambiente, se deba sustituir la palabra refractario por la de acumulador de calor.

1.3. AISLAMIENTO ACÚSTICO

La sociedad en general y los planificadores de ordenación del territorio en particular muestran una notable falta de sensibilidad en el tema del entorno urbano considerando que el ruido es el tributo que hay que pagar por el progresivo desarrollo urbano.

El ruido es causa de numerosas alteraciones del organismo humano y la tecnología pone hoy en día a nuestra disposición soluciones para abordar este vector contaminante.

Es bien sabido que la onda sonora se propaga a través del aire. Si encuentra una superficie lisa, o reflectante, se reflejará casi con la misma intensidad con la que incidió. Por el contrario si la perturbación incide contra una superficie porosa una parte de la perturbación penetra y la energía es absorbida por el medio. Así se debe distinguir entre:

- *Absorción acústica*: Se llama así a la relación existente entre la energía sonora incidente E_i y la energía absorbida α. El coeficiente de absorción, que depende de la naturaleza de cada material, varía con la frecuencia del sonido incidente.
- *Aislamiento acústico*: de una pared indica la reducción sonora en decibelios (dB) producida por la interposición de la misma entre dos medios, siendo uno la fuente sonora y el otro el local receptor. El aislamiento acústico *R* se expresa por:

$$R = 10 \log \frac{E}{\tau}$$

Donde τ representa la energía reflejada y E_i la incidente. La Figura 5.19 representa un esquema donde se aprecia la onda sonora incidente (E_i), la reflejada (τ), la absorbida (α) y la transmitida (δ).

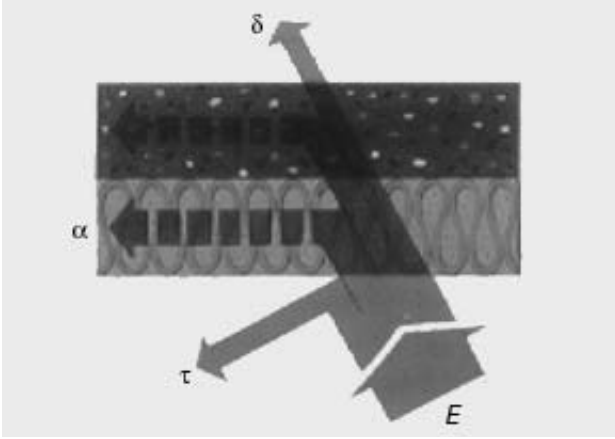


Figura 5.19. Descomposición de la onda sonora.

1.3.1. Microestructura de los aislantes térmicos y acústicos

En el caso de los materiales destinados al aislamiento térmico, ya sea a alta como a baja temperatura, el poro debe de ser cerrado. Esto es, el gas ocluido en su interior no tiene posibilidad de escapar. Además la forma geométrica del poro es, aproximadamente, la esférica.

Un material con muchas grietas no mejora la capacidad de aislamiento térmico y, en cambio, empeora en cuanto a sus prestaciones mecánicas.

En el caso de los materiales destinados a la absorción acústica interesará que la porosidad sea abierta pero, además, se comunique, en lo posible, de un extremo a otro del producto. La razón es simple, el ruido es una onda y al penetrar en la porosidad pierde energía hasta ser absorbido. Si encuentra una superficie sin porosidad, por ejemplo metálica, la onda sonora se reflejará y el material será reverberante. Así pues un material con muchas grietas, puede ser un buen absorbente acústico pero tendrá poca resistencia mecánica y será poco aislante térmico (aunque su densidad sea baja).

La Figura 5.20 muestra una microfotografía, a 5.000 aumentos, de un aislante acústico (básicamente absorbente y reflectante). Obsérvese la estructura formada por una serie de cintas con comunicación entre ellas de manera que la onda incidente encuentra mucha dificultad en atravesarla y poco a poco va quedando absorbida.

Figura 5.20. Microestructura de un material absorbente acústico.

Con mayor o menor intensidad los aislantes absorbentes también disponen de gran cantidad de porosidad cerrada, por eso muchos materiales son aislantes térmicos y acústicos, tal es el caso de las fibras.

En el punto 10 del DVD adjunto se muestran ejemplos de paneles absorbentes acústicos y aplicaciones.

1.3.2. Campos de aplicación de los aislantes térmicos y acústicos

De la misma manera que la microestructura condiciona la aplicación de un aislante para usos de aislamiento térmico o absorción acústica, la naturaleza del material que compone el aislante condiciona el campo de aplicación.

1.3.2.1. Aislantes térmicos

Para aplicaciones en interiores la gama es prácticamente infinita ya que la única variante a vigilar es la resistencia mecánica, es decir si el aislante se va a colocar en una pared que debe soportar mucho roce, su vida a ser efímera. Si, para reducir la abrasión se protege con un recubrimiento impermeable, éste debe ser lo mas delgado posible puesto que, al tratarse de un material denso será conductor del calor.

En el caso de exteriores la gama se reduce de forma drástica puesto que se presenta el problema de la lluvia y el hielo. Suponiendo que el material no se desmorone con el agua, si los poros se llenan de agua la efectividad de aislamiento se ve mermada. Por tanto habrá que recurrir a instalar pinturas de exteriores o recubrimientos metálicos. El principal problema que se presenta es que los cambios de temperatura provocan dilataciones que acaban por hacer saltar el recubrimiento o generan grietas por donde penetra el agua. La solución es colocar materiales cerámicos, que soportan todo tipo de inclemencias meteorológicas. Estos materiales, en el caso de ser razonablemente aislantes, es decir que la porosidad sea fundamentalmente cerrada, también disponen de una porosidad abierta por donde puede penetrar el agua. Así que la solución de compromiso es colocar un material cerámico ligero (densidad aparente ligeramente superior a 1.100 kg/m^3) y de mucho espesor. El motivo es que la porosidad abierta no es muy profunda y, por tanto, el agua no llegará al interior del material.

1.3.2.2. Aislantes acústicos

En el caso de aplicación de pantallas absorbentes para interiores el problema es similar al expuesto en el caso anterior, la fragilidad. Con el agravante de que la estructura de un buen absorbente acústico es mucho más delicada que la de un aislante térmico y además, no se puede recubrir con un material liso protector ya que entonces se torna reflectante en lugar de absorbente. La solución pasa por aplicar una pintura que genere muchas microgrietas.

La capacidad de aislamiento acústico tiene poco que ver con la porosidad cerrada. Un muro de granito es un perfecto aislante acústico puesto que toda perturbación sonora será reflejada. En esta misma filosofía hallan su razón de ser las pantallas acústicas

de vidrio reciclado. Es decir, el aislamiento acústico es una función de la masa en juego, a mayor masa, mayor aislamiento. El problema que presenta esta modalidad de aislante es, por una parte la propia masa volumen y costo que representa y por otra la seguridad, en el caso de aplicarlo a pantallas acústicas para tráfico urbano (hay que valorar el peligro que representa un accidente contra la pantalla).

El problema realmente difícil de resolver es la fabricación de materiales absorbentes acústicos para exteriores. Los materiales deben ser exclusivamente cerámicos. El tema se complica ya que para que los poros abiertos sean más eficaces que los cerrados, el espesor del material no puede ser importante. El problema se resuelve colocando la capa externa del material cerámico y la interna de un material convencional absorbente. Estos materiales tienen una densidad aparente comprendida entre 800 y 1.200 kg/m^3 y presentan una microestructura capaz de absorber más del 90% de las ondas sonoras incidente en un rango de frecuencias entorno a los 500 Hz, que son las mayoritarias en el caso del ruido generado por el tráfico.

2. Aplicaciones de residuos para la fabricación de aislantes

A partir de esta introducción teórica necesaria para sentar las bases de aplicación de los residuos a la fabricación de materiales ligeros de construcción, aislantes térmicos y acústicos, los apartados siguientes se destinan a mostrar ejemplos de aplicación de un sin fin de residuos a la fabricación de materiales haciendo uso de tecnologías que garanticen la inserción del contaminante en la red del nuevo material y, sobre todo, la imposibilidad de su lixiviación.

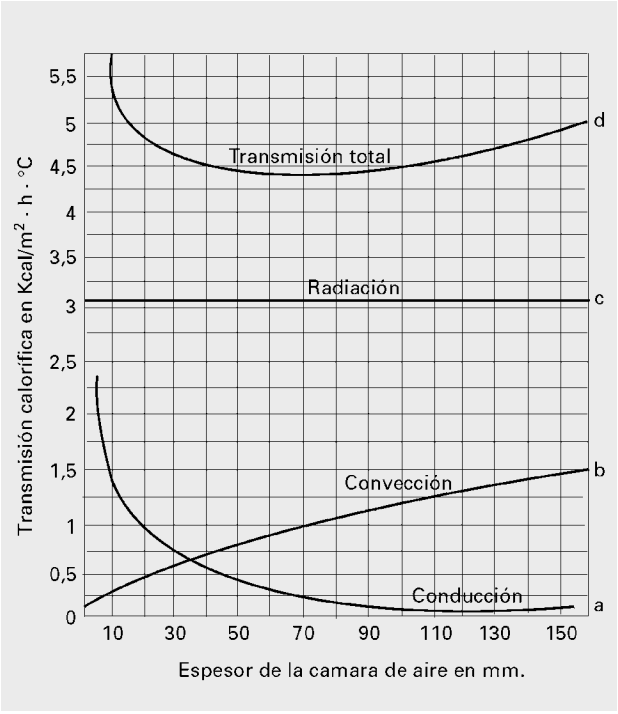


Figura 5.21. La cámara de aire y su capacidad de aislamento térmico.

2.1. USO DE RESIDUOS A GRANEL COMO AISLANTES TÉRMICOS Y ACÚSTICOS

La primera aplicación en el uso de residuos es su empleo como material aislante para rellenar las denominadas cámaras de aire. Así, como indica la Figura 5.21, una cámara de aire logra su óptimo rendimiento con una separación entre paredes de 5 a 9 cm. Sin embargo, la efectividad se multiplica cuando se logra eliminar la incidencia de la radiación térmica y ello se consigue introduciendo un aislante.

Para comprender bien el mecanismo de transmisión de calor, la Figura 5.22 muestra una pared caliente frente a otra fría. En la hipótesis de que ambas paredes estuvieran juntas (sin separación entre ambas) la conducción de calor sería máxima puesto que, a la propia conducción debería sumarse una parte de la radiación. A medida que se separan las paredes la conducción del conjunto se reduce a medida que aumenta la convección. Sin embargo la radiación térmica, el factor más importante, sigue igual.

La Figura 5.22 también muestra la sección longitudinal de una pared en la que se rellena la cámara de aire con un aislante (por ejemplo residuos de espuma de poliestireno). Si se introduce un residuo con abundante porosidad abierta se consigue un notable aislamiento acústico.

2.1.1. Paredes compuestas

El relleno de cámaras de aire con aislantes a granel presenta el problema de la compactación con el tiempo debido a las vibraciones y dilataciones inherentes

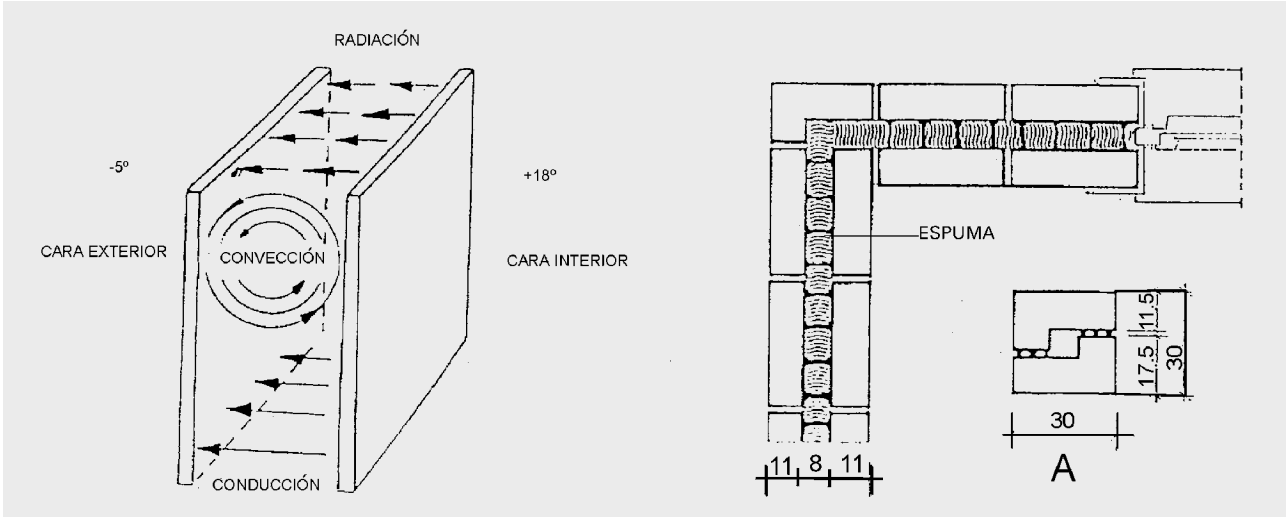
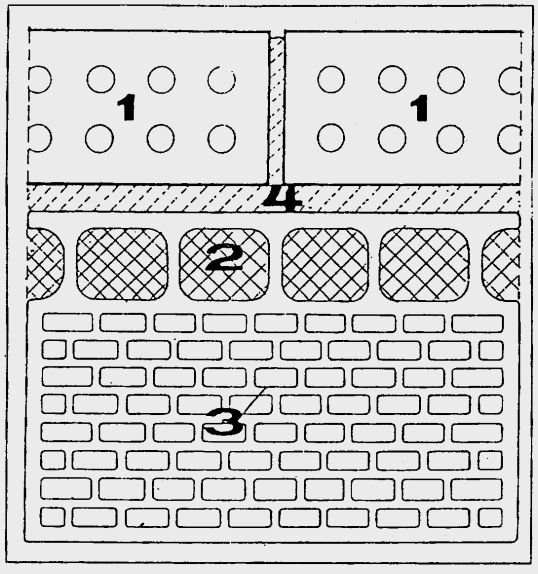


Figura 5.22. Residuo como aislante a granel en una pared.

a la dinámica del edificio. Por ello es aconsejable utilizar sistemas para inmovilizar el aislante.

Cuando se trata de residuos ligeros a granel es recomendable aglutinarlos por medio de una mínima dosis de cemento.

La Figura 5.23 muestra un ejemplo de lo expuesto: una pared compuesta diseñada para resistir climas extremos. Lo más destacable de la misma es la utilización de bloques de cerámica preparados para la inserción de materiales aislantes.



1. Ladrillo resistente a la helada.
2. Bloque agujereado con inserción de residuo.
3. Aislante térmico.
4. Mortero.

Figura 5.23. Pared compuesta

En la actualidad los fabricantes de materiales cerámicos para la construcción ya venden materiales compuestos. Así el que aparece en la Figura 5.24 corresponde a un emparedado de cerámica agujereada (que ya contiene la cámara de aire) y en el centro una lámina de fibra de lana de roca que hace las funciones de aislante térmico y acústico. Existe otra variedad que vende el mismo material pero con un rebozo de yeso por la cara interna.

Desde el punto de vista constructivo estos materiales se están imponiendo ya que los costes de instalación son muchos mas reducidos que los correspondientes a una construcción convencional.

En el punto 11 del DVD adjunto se muestran ejemplos de aplicaciones constructivas aislantes a base de materiales compuestos.

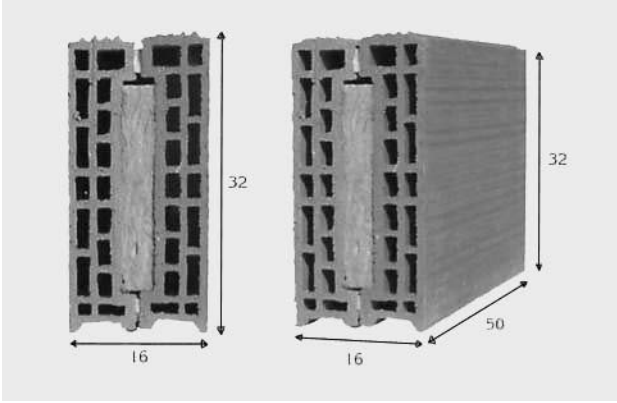


Figura 5.24. Material de construcción compuesto.

2.2. LADRILLOS AISLANTES FABRICADOS CON FANGOS

Este autor distingue entre fangos, sustancia en que la fracción orgánica supera con creces a la inorgánica y lodos, donde la fracción orgánica es prácticamente inexistente. Siendo fangos y lodos uno de los residuos más importantes de la industria (hay que pensar que las aguas residuales van a parar a la depuradora y en ella los contaminantes son transferidos a los fangos y lodos), la cerámica es una buena herramienta para valorizarlos. Sin embargo, aplicando la misma tecnología a ambos, es preciso hacer una gran distinción:

- *Ceramización de fangos* (básicamente orgánicos) va a dar lugar a materiales porosos, que son los que se analizarán en este capítulo y en el destinado a los fangos de EDAR.
- *Ceramización de lodos* (básicamente inorgánicos) va a dar lugar a materiales densos. En este caso la naturaleza de la arcilla es fundamental para evitar la emisión de los metales presentes en el residuo. Esta variante se estudiará con más detalle en el capítulo siguiente.

El Ecobrick® es un ladrillo de construcción fabricado con arcilla, fango fresco y deshidratado de una depuradora de aguas residuales (EDAR) y corteza de vegetales. En el presente párrafo se explicarán las bases para su fabricación, si bien en el capitulo destinado a la gestión de los fangos de EDAR, se vuelve a insistir en el tema específico de los fangos de EDAR, en el presente es de temática más general, puesto que en algunas comunidades, como es el caso de Cataluña, la producción de fangos y lodos industriales supera a los fangos urbanos.

2.2.1. La cerámica como tecnología para la valorización de residuos

En diversos apartados de este tratado se han apuntado las posibilidades de la cerámica como tecnología apropiada para la inertización y posterior valorización de una serie de residuos.

El fango de estación depuradora biológica contiene por término medio un 75% de humedad y su fracción seca está compuesta por materia orgánica e inorgánica en proporciones que dependen del proceso de tratamiento a que haya sido sometido.

Si el tratamiento de las aguas urbanas se realiza simultáneamente con industriales, práctica muy común en las zonas muy industrializadas, los fangos contienen también metales pesados. Ello confiere carácter especial al residuo y lo invalida para ciertos tipos de valorización, como puede ser la fabricación de compost.

El uso directo del fango en la industria cerámica presenta ciertos problemas técnicos, por eso el Ecobrick® (proceso protegido por una patente internacional) mezcla el fango con residuo forestal éste absorbe parte de la humedad y hace posible que la mezcla sea menos plástica de manera que se puede mezclar directamente con la arcilla.

Durante la cocción los compuestos orgánicos del fango: celulosa, lignina, grasas, microorganismos patógenos, etc. se destruyen y en su lugar se crean unos poros cerrados que darán lugar a sus propiedades de aislamiento térmico. Los componentes inorgánicos: arcillas, tierras, metales pesados, etc. quedan insertados en la matriz vítrea del cuerpo cerámico y, por tanto, inertizados.

El proceso también se puede llevar a cabo a partir de fango seco como el que resulta de una instalación de secado térmico de fangos.

2.2.2. La microestructura del material cerámico

La matriz silicoaluminosa amorfa es la responsable de solidificar el material cerámico cocido, en el bien entendido de tratarse de materiales cerámicos fabricados con arcillas para cerámica estructural, es decir aquellas cuyo vehículo de cohesión es la fase amorfa que puede, fácilmente, superar el 50% en peso según del tipo de arcilla usado.

Esta fase amorfa, o vítrea, rodea aquellos minerales con punto de fusión más elevado que la temperatura de cocción o ceramización, del orden de los 1.000 ℃ para los productos de cerámica estructural, también denominada roja puesto que la mayor parte de las arcillas empleadas son ricas en mineral de hierro. Estos minerales suelen ser cuarzo, feldespato, etc.; o simplemente trozos de arcilla que debido a su gran tamaño no se han descompuesto.

El SiO_2 liberado de los retículos arcillosos descompuestos ataca al óxido de cal procedente de los carbonatos y da lugar a una serie de minerales recristalizados como la gelenita, anortita, wollastonita, etc.

Muchos de estos compuestos, si el tiempo de cocción es elevado, consiguen formar puntos de unión sólido-sólido que aumentan de manera notable la resistencia mecánica del material. Los espacios libera-

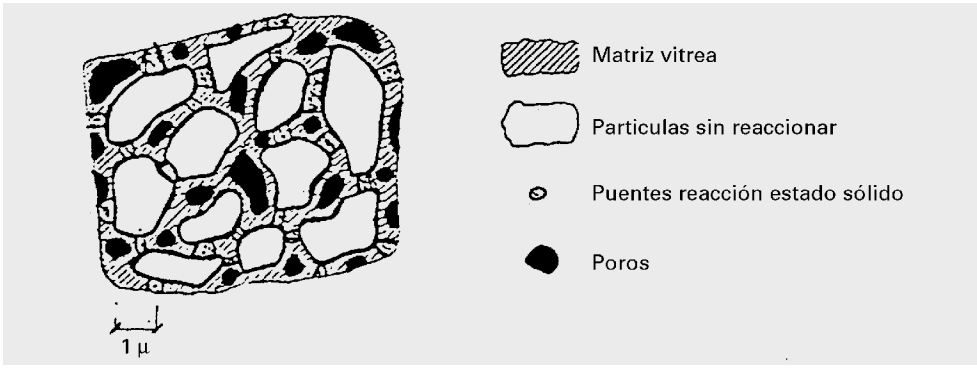


Figura 5.25. Microestructura idealizada de una matriz cerámica porosa.

dos por los compuestos que se han volatilizado, en el caso de introducir residuos combustibles o materiales orgánicos, forman la porosidad, de cuya distribución y dimensiones dependerán las propiedades del producto final.

2.2.3. Propiedades que se derivan de la microestructura

Las propiedades fisicoquímicas de un material cerámico están determinadas, básicamente, por su composición mineralógica. Esto es, la naturaleza de los cristales formados y los remanentes, su desarrollo y confinamiento en la fase amorfa o los puentes de unión entre ellos. Pero también de la calidad de la fase amorfa y, obviamente, de la cantidad, tamaño y distribución de la porosidad. En definitiva de la microestructura.

2.2.3.1. Propiedades mecánicas:

Las características mecánicas de un material cerámico dependen de:

- Caracterización de las materias primas.
- Distribución granulométrica de los componentes que integran la mezcla.
- Superficie específica.
- Condiciones de conformado.
- Curva y temperatura máxima de cocción.

Para fabricar materiales de construcción la resistencia mecánica debe presentar un mínimo. En España éste se exige de 50 kg/cm^2. Este valor se refiere a la resistencia a la compresión. La cerámica no soporta los esfuerzos de tracción. Es por ello que, en arquitectura, los materiales cerámicos se emplean únicamente como elementos resistentes a la compresión. La Tabla 5.3 relaciona la densidad con la compresión requerida para los materiales de construcción en Alemania. Los valores hacen referencia a los ensayos llevados a cabo de acuerdo con la norma DIN 105.

Tabla 5.3. Relación densidad/resistencia a la compresión

USO	Densidad (g/cm^3)	Resistencia a la compresión (kg/cm^2)
Cerramiento	0,5-1	20-120
Bloque ligero	0,6-1	200-2.800
Caravista, ladrillo mazico	0,6-1	400-2.800
Ladrillos de alta resistencia	>2	3.600-6.000

La porosidad disminuye la resistencia a la compresión puesto que decrece la sección útil de la pieza y actúa como concentrador de tensiones. Para la mayor parte de materiales, cerámicos, aceros, yesos, etc., la fórmula experimental que rige la relación entre la resistencia mecánica a la comprensión (σ) y la porosidad (ψ), en tanto por uno, es:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot e^{-(n \cdot \psi)}$$

Siendo σ_0 la resistencia teórica que tendría el material sin porosidad y n un coeficiente de valor comprendido entre 4 y 7.

Cuando se introduce material, o residuo, combustible, o es la propia arcilla la que contiene material combustible, la porosidad creada es cerrada y se halla confinada en el interior de la pieza. La posibilidad de que los poros se comuniquen entre ellos dependerá de la naturaleza de la fase vítrea. En este último caso, el material también adquiere ciertas propiedades de absorción acústica.

2.2.3.2. Propiedades térmicas

La conductividad térmica (λ) de un material es el calor por unidad de área y tiempo que fluye por una probeta de caras paralelas y de espesor unitario, cuando se establece entre ellas una diferencia de temperatura de 1 ℃. En el sistema SI la unidad es el w/m ℃ (equivalente a 0,86 kcal · m/m^2 · h · ℃). La conduc-

tividad térmica es directamente proporcional al calor específico (C_e), la cantidad y velocidad de los portadores (υ) y el camino libre medio (ξ), según:

$$\lambda = \text{fun}\ (Ce, \upsilon, \xi)$$

En los metales los portadores son los electrones. Debido a la naturaleza de los enlaces metálicos, los electrones son relativamente libres. En cambio en las aleaciones, se reduce el camino libre medio y la conductividad (λ) disminuye. Así para el cobre λ = 385 w/m · K, mientras que para el bronce (aleación de cobre y estaño) es λ = 64 w/m · K. Los materiales orgánicos, debido al tipo de enlace covalente, tamaño de las moléculas y defectos de cristalinidad, la conductividad es baja (<0,5).

En los materiales cerámicos estructurales la conductividad térmica varía de 0,7 a 0,9 w/m · K. En el caso de los materiales de naturaleza esencialmente amorfa la conductividad casi no varía con la temperatura, mientras aumenta algo en las redes cristalinas. Esta variación es fundamental para el diseño de materiales aislantes a alta temperatura pero para los que deben trabajar a temperatura ambiente, como es el caso de los materiales estructurales, esta variación es irrelevante.

En el caso de materiales porosos la cantidad y tamaño de los poros es fundamental para determinar la conductividad. Si λ_o es la conductividad térmica de la fase continua y ψ la porosidad, la conductividad del material poroso será:

$$\lambda = \lambda_o \frac{1-\psi}{1+\psi}$$

De modo que la conductividad de un material es función básicamente de la porosidad y de la conductividad de la fase continua. Esta propiedad es la que se aprovecha para fabricar materiales aislantes a partir de residuos combustibles. La Tabla 5.4 relaciona la densidad con la conductividad.

Tabla 5.4. Conductividad térmica/densidad

MATERIAL	Densidad aparente (g/cm^3)	Conductividad térmica ($w/m \cdot °K$)
Cobre	8,90	385
Acero	7,85	50-60
Ladrillo macizo	1,80	0,87
Ladrillo hueco	1,2	0,49
Ecobrick®	0,6-0,9	0,36-0,23
Tablero aglomerado	0,65	0,08
Poliestireno expandido (extruido)	0,03	0,03
Fibra de vidrio	0,03	0,03

De la tabla anterior hay que hacer la advertencia de que, a excepción de los elementos puros (Cu), el resto de datos corresponden a ciertas mezclas.

2.2.3.3. Resistencia a los agentes químicos

Los materiales cerámicos son altamente resistentes a la agresión de los agentes atmosféricos como la lluvia ácida y la contaminación atmosférica. La única excepción la constituye el ácido fluorhídrico.

La resistencia a los agentes químicos se debe esencialmente a que la difusión de los átomos (agresores) a temperatura ambiente es extremadamente lenta. La durabilidad de los materiales cerámicos es muy elevada, del orden de siglos como lo demuestra nuestro patrimonio artístico-histórico.

2.2.3.4. Retención de metales pesados

La capacidad de retención, por incorporación a la matriz cerámica, de los metales pesados es una función de:

- La naturaleza de la fase vítrea formada en la cocción cerámica.
- La temperatura de volatilización de los metales y sus óxidos.

En circunstancias normales y debido a la gran presencia de aire y temperatura que reinan en el interior de los hornos cerámicos, la mayor parte de los metales pesados aportados por los residuos se encuentran en forma de óxido, lo que favorece su incorporación a la matriz cerámica. El ejemplo más representativo es el hamatites (óxido de hierro) presente en la mayoría de arcillas que, una vez cocida, entra a formar parte de la fase amorfa y tiñe la cerámica del color rojo característico de los materiales estructurales. De hecho durante la destrucción del retículo cristalino de los minerales de arcilla, éstos se tornan muy reactivos y, en parte, funden y se inicia la producción de fase líquida. Los enlaces de las macromoléculas se rompen y los metales, u óxidos, pueden ser insertados fácilmente. Otro parámetro a tener en cuenta es el tamaño de grano del mineral de arcilla. Cuanto mayor sea la superficie específica del material tanto mayor será la formación de fase líquida y más rápidamente se atraparán los metales (volviendo al ejemplo anterior: el ceramista sabe que, con la misma arcilla ésta será más roja, una vez cocida, si tritura más la materia prima).

De acuerdo con estas premisas y partiendo de la base de que la cerámica desarrollará una abundante

fase líquida de baja viscosidad a la temperatura más baja posible, los metales más refractarios como el Cr, V y, en parte el Ni, tienen dificultad para oxidarse y entrar a formar parte de la fase amorfa por lo que quedarán encapsulados por la matriz. Mientras que el Pb, Zn, Cd y Ni sólo volatilizarán, y en parte, los que se hallen en la superficie, no así los del interior que serán englobados y pasarán a formar parte de la fase amorfa. Esto explica que, cuando se procede a un ensayo de lixiviación severo, el Cr y el V lixivian, mientras que los demás no. De hecho este comportamiento se debe a la naturaleza de los minerales de arcilla y no se observa gran diferencia entre la absorción de metales pesados en el Ecobrick® debido a la presencia de material combustible en su interior que facilita la elevación de temperatura en el interior con el consiguiente desarrollo de la fase líquida.

2.3. AISLANTES A PARTIR DE POLVO DE VIDRIO

Las aplicaciones del vidrio residual, material inorgánico por excelencia se tratan de manera mayoritaria en los capítulos siguientes. No obstante, con el vidrio también pueden hacerse materiales livianos, aislantes y ligeros. Por esta razón en esta parte se incluyen unos pequeños ejemplos.

2.3.1. Aislantes transparentes a partir de vidrio

Los aislantes convencionales son opacos a la luz. Así la conservación del calor en el interior del edificio debe confiarse exclusivamente a la capacidad de aislamiento del material, con independencia de la aportación del calor puntual que proceda del exterior, la radiación solar.

En el otro extremo los materiales transparentes, el vidrio, son eficaces en las orientaciones bien soleadas (efecto invernadero) pero sólo en climas templados ya que durante la noche presentan una gran pérdida de calor.

Una solución intermedia la constituyen los llamados aislantes transparentes, realmente son traslúcidos, que dejan pasar la luz solar (con lo que se reduce el consumo en iluminación artificial) pero son aislantes por cuanto son opacos (no dejan pasar) la radiación infrarroja. En esta tesitura son materiales ideales para construir paredes en cara norte de zonas frías ya que dejan pasar la luz, y algo de calor, pero son básicamente aislantes.

En la actualidad este tipo de materiales se halla fabricado por un conjunto de láminas, agrupadas en estructuras del tipo de «panel de abeja», de policarbonato que puede tener un espesor entre 3 y 8 cm. El paquete se instala entre dos vidrios convencionales y en el interior, de manera opcional, puede practicarse el vacío para elaborar un aislante más sofisticado.

A diferencia de los aislantes convencionales, el principio básico de los aislantes transparentes se basa en el medio radiante participante. La transferencia radiativa (fundamentalmente radiación infrarroja y visible), a través del material se produce mediante absorción, emisión y dispersión, consiguiéndose con ello coeficientes de transmisión térmica eficaces similares a los de un cerramiento multicapa convencional, esto es, 0,8 W/m^2 ℃.

La variante denominada aerogel está basada en una forma porosa de la sílice (SiO_2). El material de base para su fabricación es el tetrametoxylano ($(Si(OCH_3)_4$). Desde el punto de vista del reciclaje, para la fabricación de este tipo de aislante se comienza a ensayar el polvo de vidrio procedente de la recogida selectiva de envases de vidrio. Sabido es que este polvo no es conveniente echarlo al horno de fusión de vidrio ya que comporta problemas de sobrefusión debido a su gran superficie específica. Es precisamente esta propiedad la que se usa para la confección de estos materiales. Las partículas se ponen en contacto y con la ayuda del calor se consiguen unos puentes de unión que logran rigidizar el conjunto.

2.3.2. Vidrio espumoso a partir de desecho

El vidrio granulado espumoso tiene un peso especifico comprendido entre 180 y 300 kg/m^3 con una absorción de agua alrededor del 8%. Es un magnifico aislante y se puede usar para fabricar morteros y hormigones aislantes.

La Tabla 5.5 muestra diversos análisis de vidrios aptos para la producción de vidrio espumoso. Los vidrios de la clase lll son, básicamente, vidrio común. Sabido es que el polvo de vidrio no es apto para el reciclado típico del calcín (cascote de vidrio común) y la fabricación de vidrio espumoso es una buena solución para su reciclaje.

Para su fabricación debe añadirse un agente espumante como la calcita, diversos carbones, etc., que, a su vez, también pueden ser residuos y un agente aglomerante.

Tabla 5.5. Análisis de vidrios espumantes

			CONTENIDO DE LOS ÓXIDOS EN % DE PESO											
			SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	B_2O_3	Sb_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	BaO	Na_2O	K_2O	SO_3
Clase	I	1	80-85			10-17	10-17	2-4						0.3
		2	60-80	2-5	1	0-10			4-6	1-3	1-2	3	12	0.3
		3	50-75	2-5	1				4-6	1-3	1-2	13	2	0.3
	II	1	72	2	0.2				6	4	1-2	13	2	0.3
		2	70-73	2-7	0.2	0.4			5-8	0-3	2-3	12	15	0.4
		3	80-85	0-5	0.2	10-12			2-4	1-2		3-5		0.4
	III	1	50-80	0-20	0-3	0-10			5-15	0-7		3	7	0.4
		2	65-71	3-10	5				5	9		13	16	0.2-0.5
		3	62-74	14	5				2-6	1-3		15	17	0.6
		4	75-85	0-5	0-2				2-6	1-3		15	17	0.6
		5	50-70	0-2	0-7				2-10	2-4		12	18	1.0

2.3.3. Vidrio celular

El vidrio celular tiene una densidad aparente muy reducida y una absorción de agua prácticamente nula. De hecho es un aislante térmico excelente que, además, es impermeable.

En cierta medida, se trata de una variante del anterior donde el material fungible es un residuo de poliéster reforzado con fibra de vidrio. Este es un residuo cada vez más abundante (cascos de buques, depósitos, contenedores, tuberías, etc.) que no encuentra fácil valorización.

Para la fabricación se mezcla el residuo, que normalmente procede de un filtro de mangas de la captación de polvo, con el vidrio en polvo, con frecuencia también residuo. Una vez prensado se sinteriza en un horno a unos 800 ℃. La curva de calentamiento es muy crítica puesto que en la composición hay una gran cantidad de material orgánico.

En la combinación, el poliéster actúa como material fundente que aporta el gas expansor. La fibra de vidrio es de naturaleza casi idéntica al propio polvo de vidrio por lo que la combinación es excelente.

2.4. CERÁMICAS POROSAS PARA FILTROS

Una aplicación para ciertos residuos dentro de una masa cerámica es la de generar una determinada porosidad que le confiera propiedades filtrantes. En los últimos tiempos se esta intentando producir filtros baratos (de un solo uso. Cuando se colmatan, se ceramizan de nuevo) para filtrar aguas residuales muy sucias, por ejemplo las procedentes de los purines de cerdo una vez han sido centrifugados.

El principio de funcionamiento de un filtro estriba en retener partículas de un tamaño determinado. Para ello, en la masa cerámica se introducen unos materiales que durante el proceso de cocción produzcan la porosidad deseada.

Una variante de filtro es el difusor ilustrado en la Figura 5.26. Este consiste en un tubo, en el caso

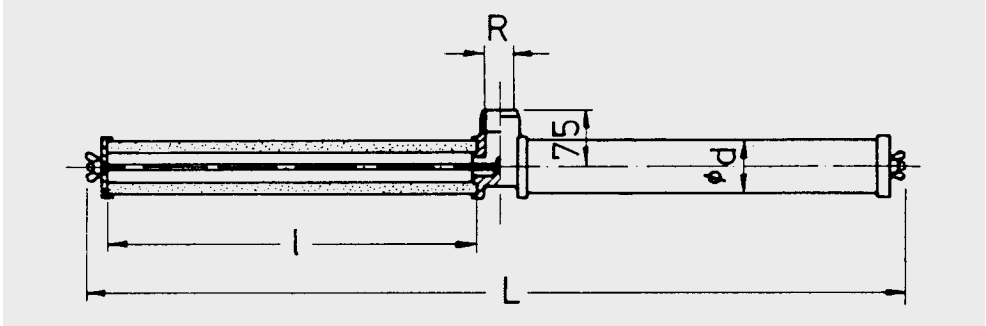


Figura 5.26. Difusor tubular para salida de aire en depósitos de aireación.

de la figura si bien hay otras formas geométricas, por el interior del cual se insufla aire. Cuando el tubo está situado en el fondo de un recipiente lleno de agua el aire fluye a través de sus poros y produce una oxigenación muy uniforme dentro de la masa de líquido.

2.5. HORMIGONES LIGEROS DE ESCORIAS

Las escorias son los residuos que generan las diversas industrias metalúrgicas básicamente en los hornos de fusión. Por el propio sistema de producción, residuo que sobrenada en la superficie del metal fundido, la escoria suele tener una matriz vítrea que mantiene los metales pesados atrapados sin posibilidad de lixiviar. Por tanto la mayoría de las escorias son inertes y por ello tienen gran uso en sistemas de aplicación directa. En la Figura 5.27 se simboliza un pavimento de hormigón en el que buena parte del árido pétreo ha sido sustituido por escorias metalúrgicas.

Según el sistema de enfriamiento empleado la naturaleza física de la escoria es diferente. Así un enfriamiento brusco al aire suele dar lugar a una escoria porosa y ligera muy apta para fabricar con ella hormigones ligeros.

Un enfriamiento lento provoca una recristalización de la escoria. La dureza es mayor pero, sobre todo, la porosidad y la capacidad de absorción de agua es muy inferior en comparación con la llamada escoria porosa, motivo por el cual este tipo de escoria es la recomendada para la formulación de morteros.

Desde el punto de vista conceptual es importante resaltar el hecho diferencial de incorporar una escoria metalúrgica, que se halla parcialmente vitrificada, o un material fácilmente lixiviable, como serían los polvos de acería. Sabido es que el hormigón de Pórtland es fácilmente atacado por los ácidos débiles e incluso por el agua de lluvia. Cuando el hormigón se va deteriorando el material interno va a lixiviar, de ahí la importancia de elegir un árido no lixiviable.

2.6. ÁRIDOS EXPANDIDOS A PARTIR DE RESIDUOS

Los áridos expandidos son agregados ligeros diseñados para sustituir a los áridos densos en la composición de los hormigones. La definición más aceptada es: «Cuerpo de geometría aproximadamente esférica y diámetro variable. Aspecto exterior liso y razonablemente impermeable. La fractura muestra un interior cavernoso y lleno de celdillas». El hecho de estar fabricados con arcilla, de forma total o parcial, permite una vitrificación superficial prematura que impide la salida de los gases durante la fase de cocción, con lo que se logra una expansión en volumen a la par que una disminución adicional de la densidad.

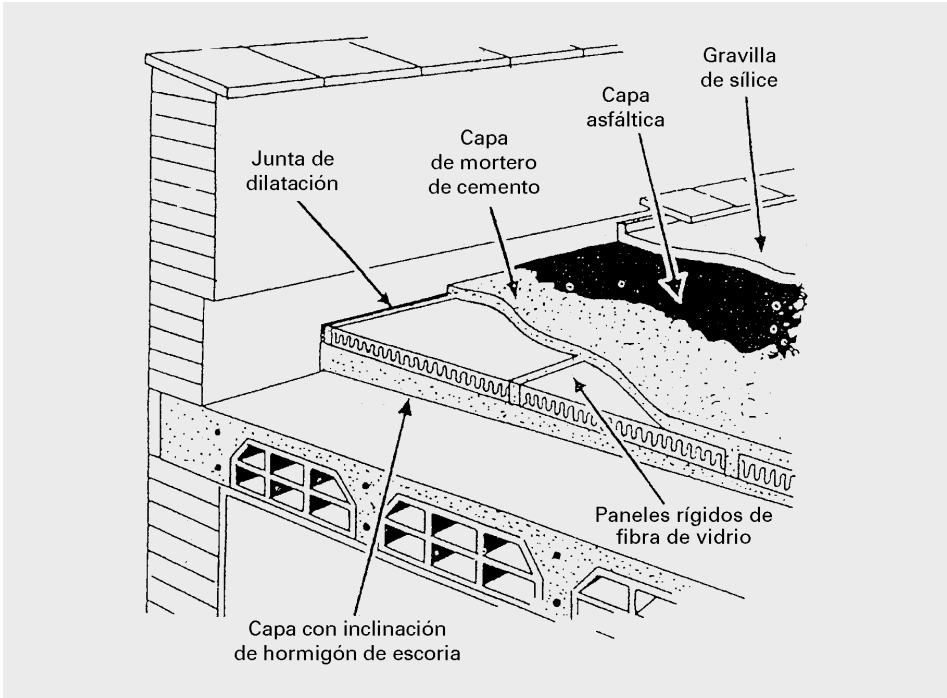


Figura 5.27. Empleo de hormigones de escoria.

Las características que debe reunir una arcilla para que expanda es que sea capaz de producir una fase vítrea muy viscosa a alta temperatura susceptible de atrapar los gases generados en su interior y que exista alguna sustancia apropiada para producir grandes cantidades de gases a elevada temperatura.

Los elementos capaces de producir gases a alta temperatura son, por ejemplo, los residuos orgánicos o que contengan notables cantidades de materia orgánica como: aceites, residuos de síntesis orgánicas, fangos de depuradoras, etc.

La Figura 5.28 indica la caracterización de las arcillas adecuadas para el hinchamiento. Además, para lograr la expansión correcta, es preciso aplicar una cuidada curva térmica en el horno.

La base para la obtención de los agregados ligeros es la arcilla. Sin embargo hay muchas arcillas que no son expandibles. De ahí la necesidad de introducir materiales ligeros (residuos) para provocar la salida de gases. Cuando, para producir árido expandido, se usa solamente arcilla, se debe elegir una que contenga una cantidad de óxido férrico superior al 8%. En el curso de la ceramización, en atmósfera reductora, el óxido férrico se reduce a magnetita y expulsa oxígeno que hace, precisamente, de agente expansor.

El principio de funcionamiento expuesto es diferente del fenómeno usado para la producción de áridos expandidos a partir de residuos. En este caso el calor reinante en el horno, el material entra directamente en el horno cuando éste se halla a más de 1.000 ℃, es tan intenso que provoca tres acciones casi de manera simultánea:

• *Ceramización parcial de la masa de arcilla*. La temperatura de la superficie es muy elevada mientras que la del interior es reducida. Además, la gran cantidad de materia orgánica y gases presentes en el interior hacen las veces de aislante térmico, lo que dificulta la transmisión del calor. Sin embargo, en la inmensa mayoría de los casos esto tienen una importancia secundaria.

• *Pirolización de la materia orgánica contenida*. En el interior del agregado no hay prácticamente aire. En cambio la intensa radiación provoca la gasificación y pirólisis de la materia orgánica. Parte de la materia coquiza (de ahí el color negro del interior) y los gases generados hacen las veces de agente expansor.

• *Vitrificación de la superficie*. El calor recibido en la superficie provoca una temperatura superior a la de ceramización y la arcilla comienza a fundir, de hecho vitrifica y se convierte en una lámina impermeable a los gases que al seguir empujando hinchan la superficie provocando la expansión y convirtiendo la superficie en un medio impermeable (los áridos ligeros no deben absorber agua, es decir deben flotar en agua).

El árido que se reproduce en la foto de la Figura 5.29 corresponde a una mezcla de arcilla y taladrina (líquido refrigerante, a base de aceite mineral y agua, que se emplea en la mecanización de metales). Sin embargo, se pueden usar cantidad de residuos orgánicos como fangos de EDAR, deyecciones de animales, etc. En Medellín (Colombia) este autor dirigió un proyecto (Proyecto ALER) de fabricación de árido expandido a partir de fango de depuradora de EDAR, fangos de papelera y, naturalmente, arcilla.

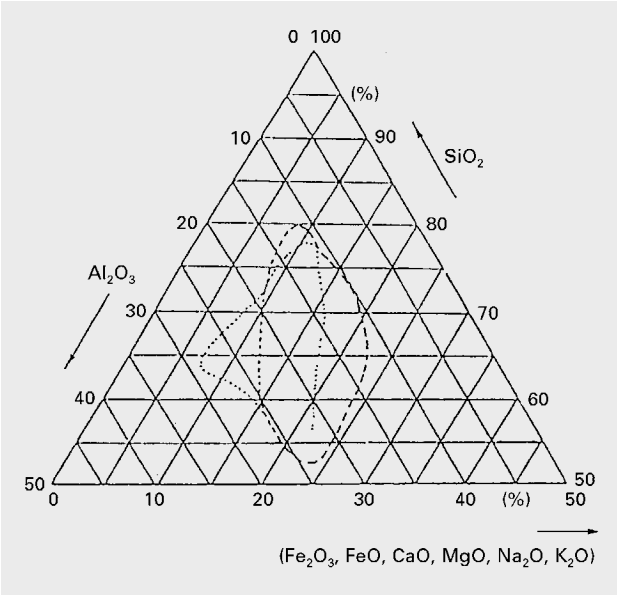


Figura 5.28. Zona de hinchamiento de arcillas.

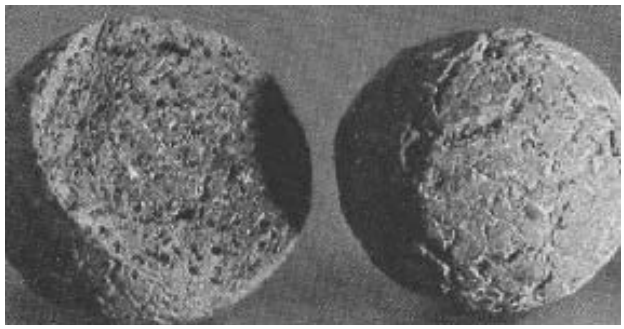


Figura 5.29. Árido expandido o agregado ligero.

La etapa de cocción es la más crítica. Durante la cocción existe una etapa de descomposición del retículo del mineral de arcilla que provoca una inestabilidad del conjunto. Ello da lugar a la formación de fase amorfa, líquida a esta temperatura, que hace las veces de elemento aglutinador del conjunto. Esta fase permanece hasta el final de la cocción y, con frecuencia, una parte de ella recristaliza y origina fases cristalinas muy estables.

La etapa de ceramización es la que requiere explicaciones de carácter ambiental. La fracción inorgánica de los fangos, en particular los metales pesados presentes, se insertaran en la fase amorfa de la matriz cerámica. Es interesante diseñar la pasta cerámica de manera que la temperatura a la que la viscosidad de la fase amorfa formada es mínima, sea inferior a la temperatura de volatilización de los metales (en puridad óxidos) pesados presentes, con ello se evita cualquier posibilidad de pérdida de metales. Por lo que hace referencia al resto de las fases minerales de naturaleza inorgánica presentes en los fangos: arenas, arcilla, limos, carbonatos, etc., son de naturaleza idéntica a los diversos minerales que contienen las arcillas en estado natural, por tanto no requieren ninguna precaución especial.

En EE UU se fabrica agregado ligero con una mezcla de fangos de papelera y cenizas volantes de centrales termoeléctricas. De hecho no es un árido expandido ya que es poroso, pero si es un agregado ligero. Existen más de 70 fábricas de este tipo en el mundo, mientras que las de árido expandido superan las 100.

La Tabla 5.6 muestra el análisis de una típica arcilla expandible una vez calcinada, que corresponde a un esquisto asociado a yacimientos hulleros. La cocción se lleva a cabo en una atmósfera reductora.

Tabla 5.6. Análisis de arcilla expandible

Óxido	Porcentaje en peso
SiO_2	55%
Al_2O_3	30%
Fe_2O_3	8%
Óxidos alcalinos y alcalinotérreos	6,5%
Otros	0,5%

En esta etapa se libera oxígeno que es, precisamente el agente gaseoso expansor.

La Figura 5.30 muestra la densidad aparente de diversos áridos. Los dos primeros, con densidades muy reducidas provienen de arcillas naturales que deben ser sometidas a un tratamiento térmico previo para lograr una expansión

2.6.1. Fabricación de árido ligero

Una planta de áridos ligeros consta de las siguientes secciones:

- Recepción y almacenamiento de las materias primas y/o residuos. Esta área incluye la mezcla, homogenización y trituración de los componentes.
- Conformación. Por lo general el árido tienen forma esférica. Para ello se usa una peletizadora.
- Secado, cocción y enfriamiento del árido. Operaciones que se llevan a cabo en cualquier ciclo cerámico, con la diferencia de que los reactores son rotatorios e independientes. En el secado suele usarse parte de la energía de la zona de enfriamiento. En el horno se emplea combustible externo (hay que añadir que en este proceso hay siempre un ahorro debido a la naturaleza combustible del propio residuo que se emplea

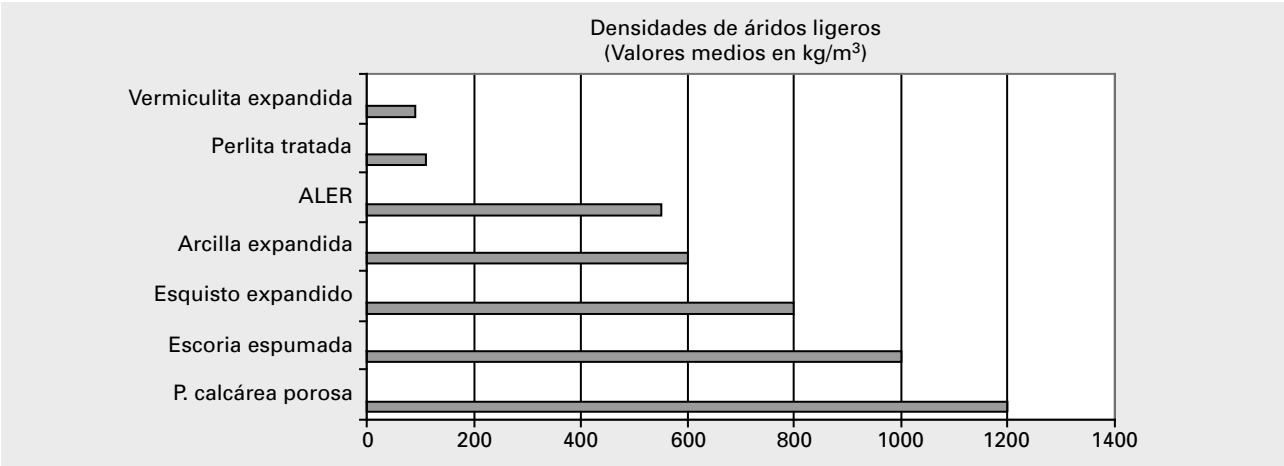


Figura 5.30. Densidades de diversos agregados ligeros.

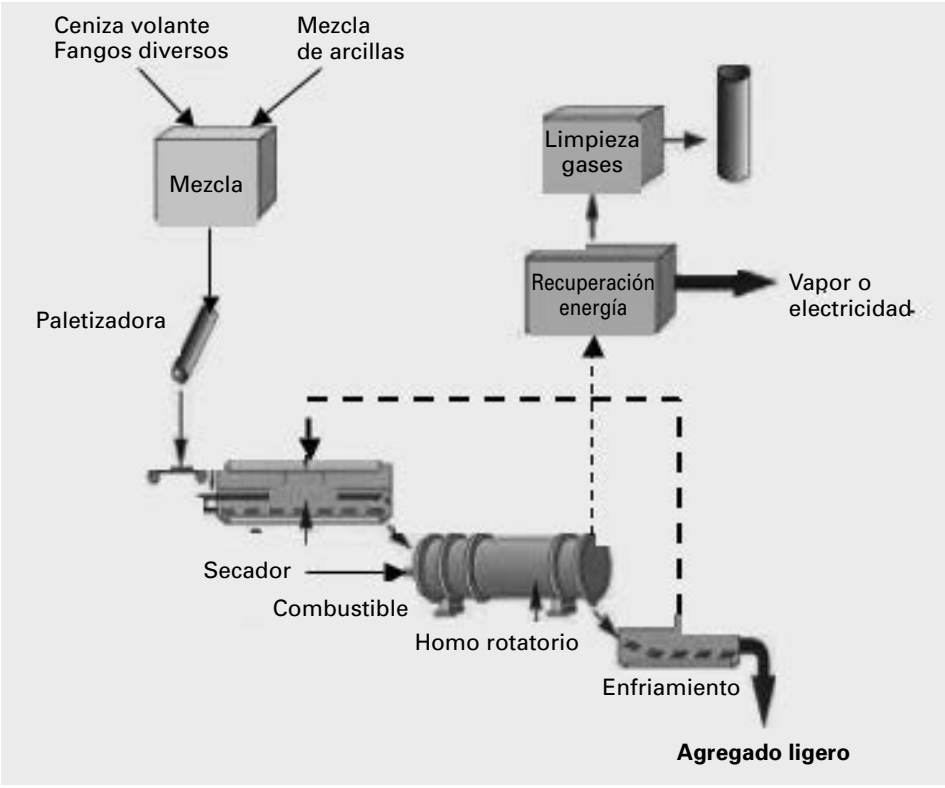


Figura 5.31. Fabricación de árido ligero.

para la obtención del árido). El material caliente se introduce, sin solución de continuidad en el enfriador, que se trata de un intercambiador (sólido/aire) de calor a contracorriente.
- Valorización energética de los efluentes gaseosos en una caldera de recuperación.
- Tratamiento y limpieza de gases a la salida de la caldera.

El tamaño del árido fabricado, por lo general, oscila de 4 a 16 mm, en función de la aplicación.

En el punto 12 del DVD adjunto se muestran diversos hornos para la fabricación de árido expandido.

2.6.2. Aplicaciones de los áridos ligeros a la construcción

Un hormigón convencional, con una resistencia típica de 200 kg/cm^2, tiene una densidad de 2.500 kg/m^3. Substituyendo el árido denso por el ligero la densidad se reduce a 1.500 kg/m^3, manteniendo la misma resistencia. Esto permite aligerar las estructuras portantes (la legislación vigente exige una densidad superior a 1.000 kg/m^3 para aplicaciones estructurales), construir edificios más altos y abaratar costes.

Otra característica intrínseca de los áridos ligeros es su capacidad de aislamiento térmico debido a la porosidad cerrada interna que poseen. Esta propiedad se transmite al hormigón con él fabricado permitiendo construir edificios mejor aislados.

La vitrificación superficial del árido permite la dosificación habitual de agua en la formulación del hormigón, ya que su impermeabilización impide que absorba agua lo que debilitaría el hormigón.

Otra propiedad destacable es su característica ignífuga por cuanto el árido ha sido fabricado a alta temperatura.

Existe una clara correlación, como muestra la Tabla 5.7, entre la densidad y la conductividad térmica para diversos materiales y, en particular, los hormigones ligeros.

Tabla 5.7. Densidad y conductividad de agregados ligeros

MATERIAL	Masa volumétrica kg/m^3	Conductividad térmica W/m °K
Hormigón de escoria metalúrgica porosa	1250	0,38
Esquisto expandido	1370	0,58
Arcilla expandida	1300	0,5
Hormigón de arcilla expandida	1600	0,6

2.6.3. Otras aplicaciones de los agregados ligeros

Para rellenos de lechos sumergidos. Los áridos ligeros, porosos en este caso, se usan para el relleno de lechos inundados para la depuración de aguas residuales procedentes de industrias conserveras, que poseen una elevada carga orgánica (4.300 mg/l DQO). Gracias a la porosidad del árido (en este caso se utilizan tamaños de 2 a 4 mm de diámetro) y su gran superficie específica de 4 m^2/cm^3 (del orden de 200 veces superior a los soportes que se emplean en los lechos de percolación) y una densidad aparente semejante a la propia agua proporciona un buen hábitat para los microorganismos encargados de la eliminación de la materia orgánica.

Para el uso de la arcilla expandida en la horticultura se tienen que considerar otros criterios de calidad que los requeridos en el ámbito de la construcción. La característica más importante es el contenido en sales solubles. Para la evaluación de la calidad además se tiene que considerar la composición de las sales, la existencia de materias fitotóxicas y el valor del pH.

De todos los ensayos el más significativo es la capacidad de absorción de agua con el tiempo. La mayor parte de los agregados ligeros, de interés agrícola, muestran un valor del 75% de absorción de agua a los cinco minutos de la puesta en contacto del árido con el agua.

La resistencia al fuego de los hormigones fabricados con áridos expandidos es una de las ventajas que proporciona el uso de estos agregados, básicamente ya que se trata de buenos aislantes que dificultan la penetración del calor y la estructura se torna más resistente. La mayoría de las normas exige que el material estructural resista los 500 ℃ durante los cinco primeros minutos, llegando a 800 ℃ a los 20 minutos. Desde el punto de vista de la seguridad, los hormigones fabricados con áridos ligeros conservan un 80% de la resistencia mecánica a temperaturas superiores a 600 ℃. A este factor hay que sumarle un mayor poder aislante, lo cual mejora todavía más sus cualidades frente al fuego.

2.6.3.1. La perlita expandida

La perlita natural es una roca volcánica que contiene, como la mayoría de los silicatos, agua de cristalización en su molécula. Para transformarla en árido ligero, una vez triturada, se introduce en un horno a unos 1.200 ℃ donde se expande gracias a la salida del agua. En el proceso se forman unas estructuras semejantes a microceldas vacías pero el volumen ha aumentado casi 20 veces. La densidad aparente está comprendida entre 50 y 125 kg/m^3. La conductividad térmica oscila de 0,035 a 0,045 $kcal/m^2 \cdot h \cdot ℃$. Lógicamente se trata de un árido poroso.

Mantiene intactas sus propiedades de no contener sustancias tóxicas, no contiene materia orgánica, no es higroscópica. Un hormigón aislante puede responder a la siguiente fórmula:

- 9% en peso de cemento.
- 73,4% en peso de perlita.
- 17,6% de agua y aireantes.

2.6.3.2. Las zeolitas

Las zeolitas son silicatos de composición general parecida a los feldespatos, silicatos aluminosos con agua de cristalización (existen más de 40 zeolitas naturales). Son materiales hidrófilos y también pueden adsorber moléculas orgánicas de tamaño inferior a su propio poro o celda elemental. Las zeolitas tienen un tamaño de poro regular, por lo que se les denominan «tamices moleculares».

El proceso de activación consiste en un calentamiento para desorber los productos presentes y dejarla preparada para su función, que pueden ser variadas:

- Intercambio selectivo de iones. En forma de polvo se usa para captar cationes radioactivos (se ha empleado para eliminar estroncio radioactivo en concentraciones de hasta 1 mg/l). Para suavizar el agua, a base de intercambiar iones de Ca y Mg. Una de estas aplicaciones, desarrollada en la universidad de Birmingham (RU), ha consistido en expandir la zeolita que, más tarde se pone en contacto con el líquido radioactivo, disminuyendo la presión de operación hasta que la disminución del tamaño de poro impide la salida del contaminante.
- Adsorción, de manera parecida a lo que hace el carbón activo. Por ejemplo, el aire viciado antes de entrar al incinerador, se hace pasar por un lecho de zeolitas.
- La zeolita puede actuar como un «ácido sólido».
- Tamiz molecular. La variante mineral denominada chabacita, se usa como tamiz molecular para eliminar los SO_x de los gases de combustión de los motores diesel. La clintotilotita se

emplea para remover el amoníaco de las aguas residuales. La aplicación más relevante, correspondiente a la especie de la mordenita, es la capacidad de separar el oxígeno del nitrógeno atmosférico gracias a la adsorción del oxígeno (es una técnica que se emplea para generar oxígeno en procesos industriales).
- Como catalizador se sigue usando e investigando para transformar el etanol en gasolina.

Una aplicación directa, sin activar, consiste en adicionarla al clínquer con lo que se fabrica un cemento de zeolita de la siguiente composición:

- 60,8% de clínquer.
- 35,1% de zeolita.
- 4,1% de yeso.

2.7. ÁRIDOS ARTIFICIALES A PARTIR DE ESCORIAS DE RSU

Las incineradoras de residuos sólidos urbanos generan, en promedio, un 22% de escoria con respecto al residuo entrante. Teniendo en cuenta que una planta de tamaño medio pueda tratar 200.000 toneladas al año de RSU, la cantidad de escorias producidas será de 44.000 t. Cifra muy importante a la que es preciso hallar nuevas vías de valorización.

Debido al sistema de funcionamiento de las incineradoras convencionales que suelen trabajar con el RSU «todo uno», o sea sin apenas separación previa, las escorias se hallan repletas de metales férreos, no férreos y vidrios que deberían ser separados antes de procesarlas. Con el pH normalmente ácido de las basuras domésticas y la heterogeneidad de materiales presentes (por ejemplo, pilas) es fácil la incorporación de metales pesados. Por otra parte el sistema de parrilla del que disponen los hornos conlleva el que las escorias contengan una cantidad variable de materia orgánica. Todo ello conduce a que las autoridades de la mayoría de los países otorguen a las escorias un carácter de no inerte (en algunos países es clasificada como tóxica y peligrosa). Además ello supone la invalidación de este residuo para ciertas aplicaciones a granel, por el peligro de lixiviación y de estabilidad del talud por causa de la fracción orgánica.

La aplicación de la cerámica al proceso de valorización de las escorias consiste en la extracción de todos los metales, su mezcla con arcilla y la cocción para transformarla en árido más o menos ligero. La materia orgánica ayuda a la expansión del árido y los metales de pequeño tamaño quedarán insertados en la matriz vítrea tal como sucede en el proceso Ecobrick®. La escoria, una vez limpia, se tritura hasta obtener un polvo inferior a 300 µm, se mezcla con la arcilla, se peletiza y se cuece hasta llegar a una temperatura con un tiempo de retención que dependerá, básicamente, del tipo de arcilla usado. En función de la caracterización de la escoria y la clase de arcilla, se pueden obtener áridos semiligeros a partir de combinaciones del 15% arcilla y 85% escoria. La Tabla 5.8 reproduce el análisis químico de una escoria, procedente de la incineradora de Rotterdam, y el agregado obtenido.

Tabla 5.8. Análisis químico de escoria «limpia» de la incineración de RSU

Óxido	Escoria	Agregado
SiO_2	57,5	63,42
Al_2O_3	6,55	7,36
Fe_2O_3	10,17	8,01
CaO	9,43	10,32
Na_2O	5,32	4,26
K_2O	1,19	1,56
SO_3	0,88	0,65

Hay que advertir que en función del tipo de arcilla empleado, a veces no se dispone in situ de arcilla expansiva, el árido producido no es propiamente ligero ya que puede tener una densidad de 2.150 kg/m^3, frente a los 2.600 de una grava convencional. Cuando se alcanzan estas características la resistencia mecánica es alta y la absorción de agua también (normalmente supera el 10%) y ello es una prueba más de que el árido producido no es ligero. No obstante, es perfectamente válido para fabricar hormigones.

Desde el punto de vista ambiental, habida cuenta de la presencia de SO_3, éste puede descomponerse y ser emitido por la chimenea. En este caso se deberán desulfurar los gases de combustión.

2.8. OBTENCIÓN Y EMPLEO DE MICROSÍLICE

Existe una industria muy importante relacionada con la sílice que no se usa habitualmente en la industria cerámica pero es muy importante en el sector químico y la construcción. Las variedades más importantes son:

- *Sílice de partículas coloidales.* Con frecuencia denominada *microsílica* o *silica fume* que consisten en partículas esféricas de tamaños que van de 0,2 nm (nanómetros) a 1 micra y con-

tienen el 90/98% de SiO_2. Por ser de naturaleza coloidal la solución es muy estable (no decanta). Es un material reactivo y se emplea en la construcción y fabricación de refractarios.

- *Sílice precipitada.* Se obtiene por reacción de precipitación a partir del silicato sódico y el ácido sulfúrico. Se emplea para el reforzado de plásticos y rellenos de pinturas y superficies. Como agente espumante y como aditivo para el control de propiedades reológicas.
- *Fumed silica.* También llamada sílice pirogénica ya que se obtiene a alta temperatura. Son partículas de pequeño tamaño, de 5 a 20 nm, y no porosas, por lo que sus suspensiones aportan tixotropía y viscosidad. Se emplean en pinturas, geles, sellantes, adhesivos, cosméticos, etc.
- *Geles de sílice.* Se utiliza como desecante, agente clarificante en bebidas comerciales (vino, cervezas, zumos de frutas, etc.), en la industria del papel para poder aumentar la velocidad de secado, etc.

Debido a que se trata de un material de creciente importancia, una parte de microsílice (MS) de calidad puede reemplazar a tres partes de cemento en la formulación del hormigón además de aumentar la resistencia mecánica como indica la Tabla 5.9, y que su «descubrimiento» esta relacionado con el medio ambiente, conviene analizarlo por su origen.

Tabla 5.9. Aumento de la resistencia mecánica de los hormigones con microsílice

% MS de arroz	% C. Portland	% Cal viva	Resistencia N/mm² a los 28 días
80	0	20	36,0
70	30	0	44,0
50	50	0	59,0
30	70	0	60,5
20	80	0	61,5
0	100	0	43,5

La explicación del aumento de la resistencia, la de la tabla anterior hace referencia a la compresión, radica en el hecho de que en los hormigones queda mucha parte de cal sin reaccionar que al ponerse en contacto con una sílice reactiva, como es la microsílice amorfa, hace reaccionar la cal remanente para formar compuestos cristalinos muy resistentes. De paso, esta reacción mejora de manera automática la resistencia del hormigón al ataque de los ácidos, puesto que no hay cal disponible.

2.8.1. Sílice de origen vegetal

Las cortezas de la mayoría de los cereales y del arroz en particular (por término medio por cada tonelada de arroz se generan 200 kg de corteza) es un residuo muy abundante en los molinos de arroz en numerosas partes del planeta. En algunas zonas se utiliza como combustible, ya que tiene un poder calorífico nada despreciable (del orden de 3.500 kcal/kg). La Figura 5.32 reproduce un esquema para el aprovechamiento energético del residuo y la valorización de la ceniza.

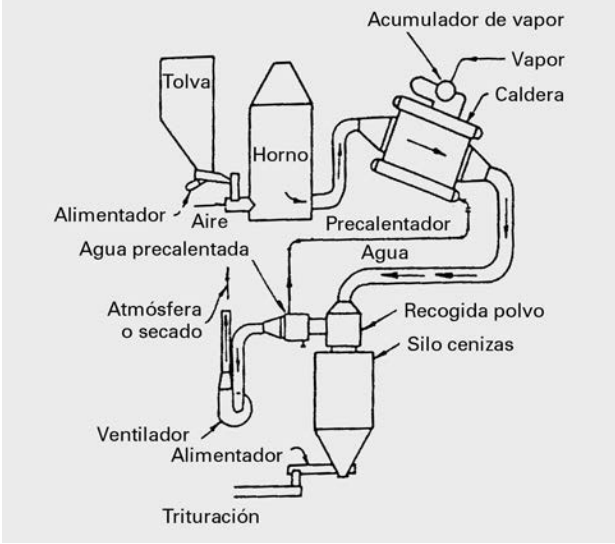


Figura 5.32. Valorización de residuos de cereales.

La ceniza obtenida de la combustión controlada es básicamente sílice (SiO_2) amorfa de alto poder puzolánico y es de color negro. La Tabla 5.10 expone la riqueza en sílice de las cenizas de otras plantas.

Tabla 5.10. Cantidades de sílice en los cereales

Planta	Parte de la planta	% Ceniza	% SiO_2
Sorgo	Cubierta de la hoja	12,5	88,7
Trigo	»	10,5	90,5
Maíz	»	12,0	64,3
Bagazo	—	14,7	73,0
Arroz	Corteza	22,0	93,0
Arroz	Paja	14,6	82,0

La corteza compuesta por celulosa, lignina y otros compuestos orgánicos se ha usado desde siempre en la formulación de piensos para alimentación del ganado, si bien su poder nutritivo es muy bajo y la presencia, precisamente de sílice, la hace poco di-

gerible. También se ha empleado directamente para la fabricación de hormigones ligeros.

La combustión de la corteza produce una media del 20% de cenizas con un gran porvenir ya que es un claro sustituto, o aditivo, del cemento en la formulación de hormigones. Debido a la propiedad puzolánica de estas cenizas la totalidad de la cal remanente en el hormigón reacciona y aumenta de manera notable la resistencia mecánica y la impermeabilización del hormigón.

Para ello es fundamental llevar a cabo la combustión de manera que el SiO_2 amorfo no recristalice a SiO_2 (cristobalita y algo de cuarzo y tridimita) que no tiene ninguna propiedad puzolánica ni reactividad. Por este motivo el tradicional sistema de incineración se debería cambiar por el de gasificación. Ésta consiste en una oxidación parcial de la materia orgánica donde el combustible sólido, la cascarilla, se transforma en gas de moderado poder calorífico. Con respecto a la incineración ofrece las siguientes ventajas:

- La temperatura de proceso de la gasificación suele ser más baja que la de incineración, por tanto no hay peligro de que la naturaleza amorfa de la sílice se transforme en cristobalita.
- El gas de síntesis producido se oxida posteriormente y se valoriza en una caldera de recuperación.

Algunos investigadores han trabajo, con éxito, en el uso de cascarilla de arroz como materia prima para la síntesis del nitruro de silicio. Desde el punto de vista de la refractariedad, de los nitruros, todos los esfuerzos se han encaminado hacia el Si_3N_4 y el BN. Ambos son estables en el aire. El nitruro de silicio presenta una excepcional resistencia al choque térmico y una resistencia a la abrasión a alta temperatura, por ello se emplea para la fabricación de motores de cohetes y crisoles para hornos.

En la pirólisis y gasificación parcial de la cascarilla de arroz se obtiene una mezcla de sílice amorfa y carbono (coque), materias primas muy económicas en comparación del silicio y el carbono puro necesarios para obtener el nitruro de silicio. A alta temperatura, sobre los 1.500 ºC, se sintetiza el nitruro de silicio, de acuerdo con la reacción:

$$3SiO_2 + 2N_2 + 6C \rightarrow Si_3N_4 + 6CO$$

Previamente debe tratarse la ceniza procedente de la pirólisis con HCl para eliminar el hierro presente.

2.8.2. Sílice de origen industrial

Esta microsílice, también denominada humo de sílice, es un residuo mineral amorfo de gran finura, pulverulento y esferoidal, que se origina en la reducción de cuarzo con carbón, durante los procesos de obtención del silicio y ferrosilicio en hornos eléctricos de arco. El polvo se recoge en filtros de mangas, constando de partículas esféricas con un porcentaje de SiO_2 amorfo variable entre el 85 y el 98%.

La microsílice se condensa de los gases de emisión de los hornos de producción de silicio metal y ferrosilicio.

La microsílice nace de las reacciones siguientes:

$$SiO_2 + C \rightarrow Si + CO_2$$
$$SiO + C \rightarrow SiO_2$$

La microsílice es una adición mineral activa que actúa sobre el hormigón mejorando su resistencia mecánica, modificando su reología y como consecuencia de la disminución en volumen y tamaño de los poros, mejorando su durabilidad.

La microsílice produce un doble efecto:

- *De relleno (filler).* Al actuar como consecuencia de su extremada finura como un plastificante y como centro de nucleación que reduce la red porosa.
- *Puzolánico.* Al reaccionar con la cal libre (hidróxido de calcio) de los compuestos del cemento, dando lugar a silicatos cálcicos hidratados (CSH) parecidos a los procedentes de la hidratación del cemento y produciendo con ello una estructura microscópica densa.

Los dos efectos anteriormente descritos, son la razón de las propiedades de impermeabilidad, durabilidad y elevada resistencia de los hormigones confeccionados con microsílice.

2.8.2.1. Características físicas y químicas

Los granos de la microsílice son de forma esférica, compactos y de 0,1 a 1 micrones. La elevada finura es unas cien veces superior a la del cemento.

Tiene una gran superficie específica entre 15-35 m^2/g. Densidad aparente, sin tratamiento inicial (150-350 kg/m^3). Después de la densificación (600-650 kg/m^3). Los análisis químicos medios se hallan reflejados en la Tabla 5.11.

Tabla 5.11. Características químicas de la microsílice

	SiO_2	CaO	AlO_3	Álcalis	Cl	PF
Microsilice	>85%	<1.0%	<1.0 %	<0,8 %	<0,10%	<6%
Cemento tipo I	17-25	60-67	2-8	0,3-2,5	—	—
Cenizas volantes	40-50	1-5	20-30	0,5-3		7

La microsílice extraída directamente del filtro de mangas (densidad aparente de 150-350 kg/m^3) es de densidad parecida al humo. La microsílice es autonivelante como un liquido, y distinto a otros polvos, no se mantiene por si misma en sacos. Es tan ligera que casi flota.

La densificación cambia completamente la apariencia de la microsílice. Con una densidad de 300 kg/m^3 esta se parece a un polvo fino. Con una densidad de 400 kg/m^3 es ya de forma granular y con 600 kg/m^3 el tamaño del grano aumenta casi a 0,5 mm. En tanto en cuanto se incremente la densidad se aumenta la capacidad de manipulación de la microsílice.

El contacto íntimo entre las partículas reduce el volumen pero no cambia las propiedades físicas ni químicas de la microsílice.

La microsílice sin densificar y densificada se comercializa con unas densidades de 150-350 kg/m^3 en el primer caso y 550-600 kg/m^3 en el segundo.

2.8.2.2. Ejecución del hormigón con microsílice

La adición de la microsílice a los morteros y hormigones convencionales (HC), da lugar a nuevos hormigones con marcadas características diferenciales que han sido denominados Hormigones de Altas Prestaciones (HAP), por la indiscutible mejora de sus características sobre los hormigones convencionales (HC).

Estas características diferenciales deben tenerse en cuenta en la dosificación, amasado, transporte, puesta en obra, y compactación de los (HAP). Ahí radica el punto delicado en la adición de la microsílice a los hormigones. Para obtener un (HAP), deben de utilizarse relaciones agua/pasta cementícea (a/c) bajas. Por a/c debe entenderse siempre la relación agua/cemento + microsílice.

La adición de la microsílice a los componentes del hormigón da al producto en curso de amasado, una apariencia más viscosa que induce a compensar con una mayor adición de agua.

Al aumentar la relación agua/cemento + microsílice se degrada la calidad final del hormigón. Es conveniente mantener relaciones a/c entre 0,30 y 0,35.

La utilización de aditivos superfluidificantes y plastificantes en sinergia, es prácticamente necesaria en la fabricación de Hormigones de Altas Prestaciones con microsílice. La utilización de aditivos reduce la apariencia viscosa de los HAP y mejora la trabajabilidad de los mismos.

Los tipos de aditivos mas corrientemente utilizados son los monosulfonatos, condensados de formaldehído y naftaleno sulfonado y condensados de formaldehído de melamina sulfonada.

Un efecto lateral de los superplastificantes ordinarios basados en lignosulfatos es el retardo del fraguado del hormigón, marcando esto un límite en la dosificación de aditivos. Como guía, una dosificación normal de microsílice debe estar comprendida entre el 5% y el 15% del peso en cemento.

Por norma general, manteniendo el mínimo contenido de cemento prescrito, pueden alcanzarse las mismas prestaciones mecánicas, reemplazando 3 partes de cemento por 1 de microsílice.

Las dosificaciones de tanteo que se recomiendan, contendrán microsílice en el siguiente porcentaje del contenido de cemento:

- Hormigón normal 5-7%
- Hormigón de alta resistencia 8-10%
- Hormigón submarino 11-15%
- Ayuda al bombeo 2-4%
- Hormigón proyectado 5-10%

Para obtener el efecto máximo, se recomienda adicionar la microsílice al cemento y posteriormente añadirle el agua.

Debido a la muy alta superficie especifica de las partículas, es importante que el tiempo de mezclado sea un 10 ó 20% más elevado que el utilizado para el hormigón convencional.

La gran área superficial de la microsílice, introduce propiedades reológicas al HAP, diferentes de las del HC, lo que obliga a:

- Reducir el contenido de finos.
- Incrementar la proporción de árido grueso, si bien el tamaño máximo de los mismos suele ser de 12-15 mm.

2.8.2.3. Permeabilidad

La utilización de la microsílice permite una importante reducción de la permeabilidad del hormigón.

La reacción química del cemento con la microsílice, unido al efecto filler de las micro partículas de la misma, producen un hormigón muy denso, protegiendo a las armaduras de los repetidos ataques de los cloruros, sulfuros y otros agentes químicos.

La elevada proporción de partículas finas en el hormigón adicionado con microsílice incrementa la adherencia de los componentes (áridos, arena y cemento) y de estos con las armaduras. Este aumento de adherencia, optimiza su utilización en:

- Morteros y hormigones proyectados, al reducir el rebote y permitir un mayor espesor de capa en cada pasada.
- Estructuras y elementos que deban tener elevadas resistencias a compresión.
- Trabajos de reparación de estructuras existentes, al mejorar la unión entre el viejo y nuevo hormigón.

2.8.2.4. Resistencia a los agentes químicos

La adición de microsílice en el hormigón es sumamente beneficiosa por:

- Reducir la penetración de cloruros.
- Retrasar el ataque de cloruros.
- Una vez iniciado el ataque, reduce el porcentaje de la corrosión.

Normalmente en un hormigón, el ataque por cloruros se debe a la acción del agua de mar, o por culpa de los cloruros contenidos en los tratamientos de los pavimentos para prevenir la helada.

La elevada alcalinidad del hormigón, provoca que el agua de los poros tenga un pH de 12,5-14 forme una película de óxido que protege a las armaduras. El ataque de cloruros o la carbonatación provoca una rotura de la película de pasivación. Una vez iniciada la corrosión, la velocidad de la misma depende de la transferencia de oxígeno a través de la masa de hormigón y de la resistividad eléctrica del mismo.

La adición de la microsílice reduce la cantidad de poros capilares en el hormigón e incrementa la resistividad eléctrica. Ambos efectos permiten obtener hormigones con una mayor resistencia a cloruros.

Un hormigón con cemento sulforresistente es resistente al ataque de sulfatos. Un hormigón con microsílice es:

- Resistente al ataque de sulfatos.
- De menor permeabilidad.
- De mayor resistencia mecánica.

La acción de los sulfatos en el hormigón puede deberse a la existencia de suelos con sulfatos, al agua del terreno, a los desagües de industrias o al agua del mar.

El ataque por sulfatos se produce porque el $Ca(OH)_2$ generado en la hidratación del cemento reacciona con los sulfatos formando yeso, que a su vez reacciona con el C3A del cemento formando etringita que es expansiva y produce la fisuración y rotura del hormigón.

El beneficioso efecto de la microsílice se debe a que:

- Reduce la permeabilidad del hormigón.
- Reduce la cantidad de Ca(OH)2 libre por reaccionar con el sulfato.

La resistencia de un hormigón, al ataque de sulfatos es función de:

- Condiciones de exposición (% de sulfatos en las inmediaciones del hormigón).
- Permeabilidad del mismo.
- Composición del cemento utilizado (% $Ca(OH)_2$ del proceso de hidratación).
- Humedad, siempre es necesaria para las reacciones expansivas.

El componente básico del hormigón, que es el cemento, se descompone por la acción de los ácidos orgánicos e inorgánicos. Los principales ácidos orgánicos que son corrosivos son el ácido acético, el fórmico y el láctico. Los principales ácidos inorgánicos (HCl, HNO_3, H_2SO_4) son corrosivos porque forman sales solubles de calcio que reducen la resistencia del hormigón.

El factor más importante en la resistencia a los ácidos de un hormigón es su permeabilidad. Una elevada permeabilidad del hormigón permite el ataque de los ácidos, propagándose la descomposición por toda la masa.

La adición de microsílice a un hormigón reduce la permeabilidad del mismo. Adicionalmente, la acción puzolánica de la microsílice reduce el $Ca(OH)_2$ libre producido en la hidratación del cemento y disminuye por lo tanto, la posibilidad de formar sales solubles.

En un hormigón, la reacción de un árido silicio con el álcali del cemento, se debe a la reacción de la sílice presente en los áridos con los álcalis (Na_2O y K_2O) del cemento, dando lugar a un silicato alcalino en forma de gel, que se expande en presencia del agua, produciendo la disgregación y rotura de la masa de hormigón.

Las condiciones necesarias para que se produzca una reacción árido/álcali son las siguientes:

- Elevado contenido de álcali en el cemento (superior al 0,6% del peso del mismo).
- Existencia de áridos reactivos.
- Acceso a la humedad (mayor del 75%).
- Existencia de áridos gruesos de tamaño máximo.

El efecto que produce la adición de microsílice (5-15% en peso de cemento) en un hormigón es la siguiente:

- Reaccionar con los álcalis del cemento.
- Reducir la permeabilidad y limitar la entrada de humedad.
- Reducir la cantidad de cemento sin afectar a la resistencia mecánica.

2.8.2.5. Hormigones de alta resistencia (HAR)

La microsílice en combinación con un superplastificante reductor de agua, se utiliza para diseñar hormigones de muy alta resistencia. Es posible obtener una resistencia que sobrepase los 100 Mpa y un asiento de 150 mm.

Los HAR se han desarrollado fuertemente durante los últimos veinticinco años, utilizándose primordialmente en:

- Estructuras de puentes.
- Edificios de gran altura.
- Hormigones proyectados.

La microsílice es ideal para su utilización en estructuras sometidas a exposición ambiental relacionados con procesos de degradación debidos a corrosión de armaduras, ataques químicos, heladas con o sin sales fundentes, erosión, etc.

Las aplicaciones más significativas son:

- Losas de pavimento de carreteras, aeropuertos y aparcamientos.
- Puentes, minas y túneles.
- Estructuras subterráneas y estructuras marinas.
- Prefabricación.
- Edificios de gran altura.
- Plantas de tratamiento de aguas residuales y pavimentos para industrias químicas.
- Hormigones refractarios.

En general se puede indicar que la adición de microsílice a los hormigones permite obtener:

- Estructuras y elementos con mayor durabilidad.
- Una mejora en los rendimientos mecánicos.
- Una optimización en los procesos de construcción, reduciendo costes y plazos de ejecución.

En aplicaciones específicas tales como prefabricados, los hormigones con microsílice, permiten:

- Mayor resistencia mecánica a edades tempranas.
- Reducción del peso propio de la estructura.
- Reducción de costos por mayor reutilización del encofrado.

A titulo de resumen, y siempre sujeto al ensayo especifico que debe realizarse para cada aplicación de los hormigones con microsílice, la Tabla 5.12 lleva a cabo un resumen.

Tabla 5.12. Características generales de la aplicación de la microsílice

Resistencia a compresión	+30%
Resistencia a flexión	+50%
Difusión de cloruros	−500%
Permeabilidad de cloruros	−10.000%
Permeabilidad al agua	−10.000%
Espesor de paso en gunitado	+500%
Capacidad de bombeo	+20%
Resistencia a los ácidos	+300%
Resistencia a la abrasión	+200%
Resistencia a sulfatos	+300%

2.9. VALORIZACIÓN DEL PAPEL USADO

La Confederación de Industrias Papeleras Europeas (CEPI, por sus iniciales en inglés) ha publicado en el año 2005 que en los países de la UE las principales fuentes de recuperación de papel para su reciclaje son los residuos domiciliarios (40%), residuos industriales y comerciales (50%) y los residuos de oficinas (10%) siendo el sector de recolección domiciliaria el que mayor crecimiento reporta con un incremento del 5% más con respecto al año anterior.

El destino del papel recuperado y reciclado es principalmente la fabricación de cartón corrugado para embalajes (45%), seguido de papel para impresión de periódicos (19%), material de envoltorio y embalajes diversos (10%), papel de oficina (8%), cartón (7%), papel sanitario y pulpa (7%) y otros usos (4%).

El papel y la industria papelera en general es uno de los sectores industriales mejor posicionados de cara al desarrollo sostenible. El ciclo del papel, controlando la contaminación, es cerrado y sostenible. Los árboles fijan CO_2 que queda almacenado en forma de biomasa. Los bosques son un sumidero natural de CO_2, calculándose su capacidad en un millón de toneladas secuestradas de CO_2 por cada 50.000 Ha de bosque. El eucalipto, el pino radiata y el chopo permiten obtener rendimiento a los 11-13 años de su plantación.

La fabricación de papel a partir de fibra virgen y de papel recuperado son, en realidad, dos facetas del mismo proceso. En 2004, el consumo específico de papel era de 170 kg/habitante y año, muy lejos de otros países como EE UU (314), Japón (241) o Alemania (228). Sin embargo, el residuo común es importante por ello se destina un apartado para valorar las posibilidades de valorización.

En la actualidad existen tres sistemas de fabricar papel, a partir de:

- Pastas mecánicas de coníferas.
- Pastas químicas al sulfato (kraft)
- Pastas recicladas (papelote)

En Europa, y en datos de 2001, las materias primas para la fabricación de papel eran:

- 41% Papel recuperado (papelote).
- 42% Pasta de papel, de madera.
- 15% Pastas de materiales no fibrosos.
- 2% Otras pastas.

En el punto 13 del DVD adjunto se muestra información sobre el principio de la fabricación de papel.

2.9.1. Definición de pulpa, papel y cartón. Fabricación

El papel es «una hoja afieltrada de fibras formadas sobre un tamiz fino a partir de una suspensión acuosa». También se confeccionan muchos productos papeleros con aditivos no fibrosos y algunos métodos de formaciones en seco que no tienen importancia comercial.

La pulpa es el material fibroso para la fabricación del papel. Es de origen vegetal y en algunas aplicaciones se utilizan fibras animales, minerales o sintéticas.

La diferencia entre papel y cartón está en el espesor. Normalmente las hojas con espesor superior a 0,3 mm se clasifican como cartones.

Desde el punto de vista botánico las maderas se clasifican en gimnospermas denominadas maderas blandas o coníferas y las angiospermas que son las maderas duras o frondosas. Las coníferas tienen fibras largas y blandas mientras que las frondosas son de fibra corta.

Durante el proceso de fabricación del papel, después del descortezado los troncos son reducidos a fragmentos (astillas) adecuados para el pulpeado. El diseño más común de astilladora es el de volante, que consiste en una serie de cuchillas montadas radialmente que se proyectan alrededor de 20 mm.

Para lograr óptimos resultados es necesario tener un control de la velocidad y afilado de las cuchillas. El tamaño de la astilla ideal es de 20 mm y 4 mm de espesor, pero se considera que las astillas que están entre 10 y 30 mm de longitud y de 2 a 5 mm de espesor son un material excelente para el pulpeado. Las astillas fuera de estos calibres afectan el proceso y la calidad de la pulpa.

Las astillas aceptables se aíslan de los finos y de las astillas sobredimensionadas haciéndolas pasar por tamices vibratorios. Las otras astillas son rechazadas y llevadas a una reastilladora que las convierte en trozos más pequeños. Los finos se suelen quemar junto con la corteza a no ser que existan instalaciones para su pulpeado.

El pulpeado es el proceso mediante el cual la madera se convierte en una masa fibrosa, es el proceso en donde se rompen las uniones de la estructura de la madera. Básicamente consta de una cuba de acero provista de un agitador. El proceso se puede llevar a cabo mecánicamente, térmicamente, químicamente o por combinación de estos tratamientos. Los procesos comerciales actuales se clasifican en mecánicos, químicos o semiquímicos (combinación de los químicos y los mecánicos).

Otra forma más reciente de pulpeado mecánico consiste en la desintegración y desfibrado de las astillas de madera entre los discos que giran de un refinador; el producto se conoce como pulpa mecánica de refinador. Las fibras de estas pulpas son mas largas y mas resistentes.

Las ventajas del pulpeado mecánico es que se puede convertir hasta el 95% del peso seco de la madera en pulpa, pero para esto se requiere de mucha energía. En este proceso, la pulpa tiene un pretratamiento térmico que ablanda las astillas.

Esta pulpa forma un papel opaco con buenas propiedades de impresión, pero la hoja es poco resistente y se pone amarilla fácilmente con la luz. Para logra la resistencia adecuada se le mezcla pulpa química de fibra larga a la mecánica. Estas pulpas se producen a partir de coníferas. En el pulpeado químico, las astillas de madera se cuecen con químicos adecuados en solución acuosa a alta presión y temperatura.

El siguiente proceso es el destintado, que consiste en el desprendimiento de la tinta del soporte fibroso y la separación de la tinta de la suspensión.

En el *proceso Kraft* la cocción de las astillas de madera se hace en una solución de hidróxido de sodio (NaOH) y sulfuro de sodio (Na_2S). El estar en un medio alcalino rompe las moléculas de lignina en fragmentos más pequeños facilitando la solubilización en el licor de cocción. Estas pulpas producen papeles resistentes, la pulpa cruda tiene un color marrón oscuro. Se asocia a la emisión de gases malolientes, principalmente sulfuros inorgánicos, que causan problemas de contaminación ambiental.

En el proceso al sulfito se utiliza una mezcla de ion bisulfito (HSO_3^-) y ácido sulfuroso (H_2SO_3) para solubilizar la lignina que se elimina en forma de ácido lignosulfónico. La base para el ion bisulfito puede ser calcio, magnesio, sodio o amonio. Se puede realizar en un amplio intervalo de pH. Estas pulpas son más claras, se blanquean con más facilidad pero las hojas de papel son más débiles. Este proceso se aplica a resinosas como la picea, abeto, y frondosas como el eucalipto.

Pulpeado semiquimico. Combina métodos químicos y mecánicos. Las astillas de madera son cocidas con productos químicos y la acción de pulpeado restante se hace mecánicamente. Los rendimientos de las pulpas están entre 50-90% de la madera seca.

El ideal sería un método de pulpeado químico libre de azufre; varios procesos están en investigación pero no existe ningún prototipo comercial. El interés se ha centrado en un proceso llamado soda-oxígeno, que utiliza una cocción corta en soda seguida de una deslignificación con oxígeno molecular. En laboratorio se han producido algunas pulpas con propiedades similares a las de la pulpa kraft. También se ha pensado reemplazar el Na_2S por otro catalizador para acelerar las reacciones de la sosa con lignina.

Tratamiento de las pulpas. Desfibrado. Las pulpas semiquímicas y químicas de alto rendimiento deben ser desfibradas de forma mecánica. Como el lavado de las astillas es difícil, es común que se desfibre directamente el producto del tanque de soplado.

Eliminación de nudos. Los nudos son la fracción de pulpa retenida en un tamiz con perforaciones de 9,5 mm, estos son eliminados antes del lavado de la pulpa y son desechados como desperdicio o devueltos a la alimentación del digestor.

Se pueden citar unos cuantos tipos de papeles que para su reciclado se deben tomar ciertas precauciones:

- *Papeles resistentes*: Con los papeles mas resistentes o especialmente tratados hay que conocer la naturaleza del aditivo. Deben usarse productos que no afecten a la celulosa, como el dioxano, acetona, metanol, etanol, hexano o disolventes halogenados.
- *Papeles resistentes en húmedo*: Son los papeles que contienen urea-formol. El desfibrado se facilita en medio ácido (pH 4-5). En cambio la desintegración de papeles que contienen resinas de poliamina se favorece con hidrólisis alcalina.
- *Papeles de pergamino (sulforizados)*: Se han de tratar con ácido sulfúrico o clorhídrico.
- *Papeles con brea o alquitrán*: Se deben tratar con disolventes halogenados.
- *Papeles tratados con caucho*: Se han de tratar con disolventes aromáticos como el benceno o el xileno.

2.9.2. Aspectos ambientales

En primer lugar hay que proceder a la recuperación de los licores de cocción y la oxidación de los licores negros que reduce los olores de los sulfuros.

Los lavadores de pulpa cruda suministran un licor débil que contienen entre un 12 y un 18% de sólidos, el licor concentrado quema alrededor del 60 al 65% de sólidos. La caldera de recuperación: cumple las funciones de evaporador de la humedad residual de los sólidos del licor, quema los constituyentes orgánicos con una eficiencia máxima de combustión, suministra calor para la generación de vapor, reduce los compuestos oxidados de azufre a sulfuro, recupera los productos químicos orgánicos del salino fundido y acondiciona los productos de combustión para minimizar los arrastres de productos químicos.

Blanqueo del papel

Existen varias etapas en el proceso que pueden usar cloro, soda cáustica, hipoclorito de sodio, dióxido de cloro y peróxido. Para lograr un «blanqueo total», el blanqueo se lleva a cabo en cinco o seis estadios.

El manejo del cloro es muy complicado, es un elemento que causa daños en el ambiente, en algunas formas puede ser explosivo y cancerígeno. Por esto muchas plantas han cambiado el uso del cloro por peróxido de sodio, oxígeno y agua oxigenada obteniendo muy buenos resultados en el blanqueo.

Fabricación del papel

Lista la pulpa, comienza la fabricación del papel que se hace en molinos de papel.

El proceso en las máquinas de papel contempla muchas variables tanto químicas como mecánicas e intervienen en ella muchas operaciones como flujo de fluidos, transferencia de masa y energía, calor en combinación con la química, la electroquímica y electrocinética. Esto requiere de muchos controles tanto de proceso como de calidad. Un buen molino de papel posee equipos altamente sofisticados y su operación se controla mediante computadores con software muy específicos. La Tabla 5.13 muestra los consumos energéticos para una serie de procesos de fabricación de papel.

El consumo energético de la industria papelera representa el 10% de la industria y el 4% de la total mundial. Salta a la vista de la tabla anterior que el consumo energético en la fabricación de pasta a partir de fibra virgen es mucho más alta que para pasta recuperada. En las modernas fábricas de proceso Kraft se estima que el 60-80% de la energía térmica procede de la valorización energética de las lejías negras (residuo del proceso).

Reducción de la contaminación acuosa

Una fábrica moderna de pulpa y papel busca minimizar las pérdidas del proceso y tratar los efluentes de la fábrica para que su impacto sea mínimo y no contamine.

El medio más efectivo de reducir y controlar los descargues de la fábrica y optimizar el uso de las materias primas. Las fibras, soda y lignina son contaminantes en el efluente y representan una costosa pérdida para la fábrica. La estrategia más efectiva para reducir pérdidas es la recirculación de las aguas del proceso.

El tratamiento externo se hace mediante una sedimentación que elimine los sólidos en suspensión y una oxidación biológica para suprimir la DBO.

En cuanto al consumo de agua, la Tabla 5.14 muestra los valores de los caudales de los efluentes.

La industria papelera es una gran consumidora de agua ya que se estima que ella sola acapara el 30% del consumo industrial. El consumo específico, como muestra la tabla depende del sistema empleado. Una vez más en el caso de la fabricación a partir de fibra reciclada, el consumo es menor.

Fuentes de contaminación y reducción en la planta

- Agua usada en el manejo de la madera y descortezado.
- Condensadores del digestor y evaporador.
- Agua blanca de la clasificación y depuración.
- Filtrados de los lavadores de la planta de blanqueo.
- Agua blanca de la máquina de papel.
- Derrames de fibra y licores de todas las secciones.

Tabla 5.13. Consumos energéticos en la fabricación de papel

		Cifras en kW · h/t_{Pasta}		
		E. Eléctrica	**E. Vapor**	**Total**
Papel prensa	Fibra reciclada	500-800	275-380	775-1.180
	Fibra virgen	2.200-2.400	0-200	2.200-2.600
Papel tisú	Fibra reciclada	700-800	485-580	1.185-1.380
	Fibra virgen (Kraft blanqueada)	600-800	3.400-4.800	4.000-5.600
Papel para caras (linerboard)	Fibra reciclada	300-600	140-200	440-800
	Fibra virgen (Kraft no blanqueada)	500-600	3.100-4.300	3.600-4.900

Tabla 5.14. Efluentes líquidos en la fabricación de papel

		Efuente típico M^3/t_{Pasta}	Efuente mínimo M^3/t_{Pasta}
Papel prensa	Fibra reciclada	7-20	7
	Fibra virgen	20-40	12
Papel tisú	Fibra reciclada	8-30	8
	Fibra virgen (Kraft blanqueada)	30-70	< 20
Papel para caras (linerboard)	Fibra reciclada	0-5,5	0
	Fibra virgen (Kraft no blanqueada)	15-25	14

Fuentes de contaminación atmosférica

Los problemas más grandes se dan en la fabricación de pulpas Kraft porque se emiten partículas finas por la caldera de recuperación. Las partículas gruesas vienen de las calderas de desperdicios de madera o carbón.

Los óxidos de azufre provienen de las calderas de recuperación y potencia pero los niveles de emisión son bajos. Otro compuestos orgánicos volátiles vienen de diferentes fuentes del proceso Kraft. La Figura 5.33 esquematiza la valorización energética de las lejías.

Los residuos generados, denominados «dregs» (impurezas no solubles) y «grits» (materia esponjosa y liviana) son muy alcalinos y se emplean para neutralizar la acidez de ciertos terrenos de cultivo.

Madera y medio ambiente

En el planeta, los bosques cubren alrededor de 3.900 millones de hectáreas, el 30% de la superficie terrestre. Las plantaciones forestales destinadas a la fabricación de papel constituyen alrededor del 5% de la superficie arbolada. La Figura 5.34 muestra, en datos de 1996, el destino de los 3.400 millones de m^3 consumidos (Fuente FAO).

En los últimos años, la expansión de los bosques destinados a la producción de papel se ha concentrado en las zonas templadas del hemisferio sur y en zonas subtropicales, donde el ritmo de crecimiento es alto. Las principales ventajas son:

- Permiten una mecanización eficiente, regulación de nutrientes y control de plagas.
- Se puede recurrir a la biotecnología para optimizar el crecimiento.
- Las plantaciones pueden localizarse cerca de los puntos de fabricación.

2.9.3. Los fangos de papelera

Se trata de uno de los residuos más conocidos del sector ya que a diferencia de los citados anteriormente que se reciclan, en su mayoría en la propia fábrica y se generan en poca cantidad, los fangos son

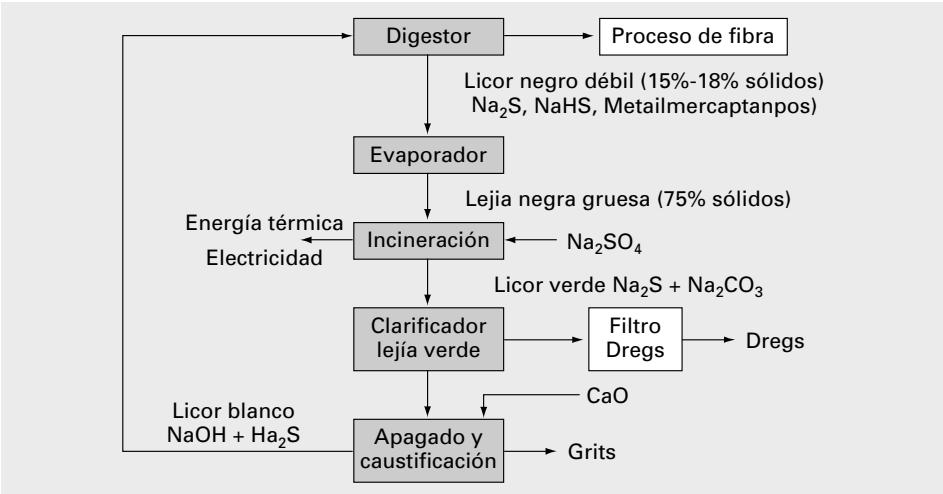


Figura 5.33. Valorización de las lejías en el proceso Kraft.

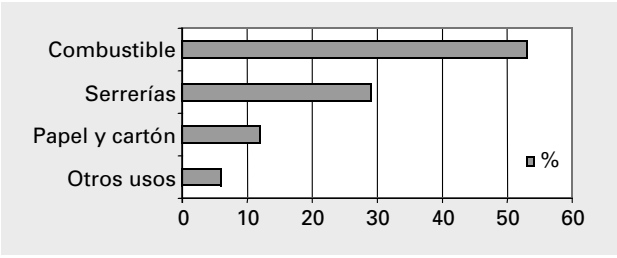


Figura 5.34. Destino de la madera.

muy importantes. Aproximadamente una tonelada de papel genera 300 kg de estos fangos. Una vez centrifugados o deshidratados en un filtro de banda tienen una humedad del 75%. Las producciones y calidades de fangos de destintado son máximas en papel tisú, papel de oficina y papel prensa, por este orden si se emplean papeles de recuperación de calidades semejantes.

En cambio son menores en la producción para la fabricación de cartón corrugado, donde, sin embargo las proporciones de rechazos pueden alcanzar valores muy elevados.

En líneas generales la fracción orgánica de estos fangos está formada principalmente por celulosa aunque cada vez más hay restos de plásticos y papeles parafinados, de aluminio, etc. La fracción inorgánica esta compuesta por los fillers del propio papel, básicamente carbonato cálcico y caolín, además de los restos de destintado. La Tabla 5.15 muestra un análisis típico de la fracción seca.

También, en cantidades menores de 15 ppm suene haber azufre, níquel, plomo, cromo y cobre. En menores cantidades aparecen PCB's (2,5 ppm) y mercurio (0,5 ppm).

Tabla 5.15. Análisis típico de un fango de papelera

FRACCIÓN MAYORITARIA	% en peso
Fracción orgánica	66
Fracción inorgánica	34
FRACCIÓN MINORITARIA	**ppm**
Nitrógeno Kjeldahl	740
Fósforo	102
Calcio	2.670
Magnesio	234
Hierro	1.280
Cloro	185
Zinc	170
Potasio	20

La mayor parte de las fábricas en la Unión Europea han analizado a fondo sus residuos y estudiado las diferentes opciones de valoración energética. Un ejemplo de la caracterización de fracciones de los residuos se muestra en la Tabla 5.16.

Tabla 5.16. Caracterización de fangos de papeleras

Material	Análisis (%)
Papel y cartón	56,00
Film y cinta de embalar	27,34
Plásticos rígidos	5,88
Madera	4,85
Otros materiales	3,31
Metales magnéticos	1,39
Vidrio	0,57
Poliestireno expandido	0,48
Metales no magnéticos	0,16
Espumas poliuretano	0,02
TOTAL	100,00

Estos fangos pueden valorizarse en una serie de aplicaciones:

- Fabricación de agregado ligero junto con cenizas volantes de centrales termoeléctricas.
- Materia prima para la fabricación de cerámica estructural.
- Combustible para generación de energía. El PCI es bajo. Se debe secar previamente, la mejor opción es el secado solar.
- Soporte para compost. Se debe vigilar la cantidad de metales.

2.9.3.1. Valorización de lodos de destintado de papel

Las nuevas políticas de desarrollo sostenible han provocado que la industria cementera utilice diferentes subproductos industriales (cenizas volantes, humo de sílice y escorias de procesos siderúrgicos principalmente) como a elementos activos para la elaboración de cementos comerciales, que permitan conciliar aspectos medioambientales de la producción de clínquer con aspectos financieros y de mercado. Es en este contexto que en España se vienen desarrollando trabajos de investigación que profundizan en aspectos científicos, tecnológicos y medioambientales para la obtención de aditivos activos a partir de la calcinación de lodos de destintado y las prestaciones de éstos en mezclas de cementos.

En España la generación de lodos de destintado se estima en cerca de las 400.000 toneladas/año; y a partir de su valorización se podrían obtener unas 150.000 toneladas/año de un nuevo material puzolánico potencialmente utilizable en la elaboración de cementos, lo que repercutiría en la industria papelera disminuyendo costos y reduciendo el impacto asociado al vertido de lodos, disminuiría la extracción de recursos minerales naturales para la fabricación de cemento y contribuiría a la disminución de emisiones de CO_2.

Los lodos de destintado de papel están constituidos mineralógicamente por: caolinita, calcita, talco y otros filosilicatos (ilitas y cloritas). Cuando este lodo es sometido a un tratamiento térmico controlado se produce un cambio en los minerales de arcilla, como la caolinita que se transforma en metacaolín por pérdida del agua de constitución, dando origen a un producto de alta reactividad puzolánica.

2.9.4. Paneles a partir de papel recuperado

El papel usado no se puede reciclar indefinidamente para fabricar papel de nuevo. Cada vez que entra en el pulper, la fibra se acorta y llega un momento que resulta inservible para esta finalidad. No obstante existen otras posibilidades como el panel fabricado a partir de mezclas de papel (reciclado), paja u otros residuos agrícolas.

El proceso de fabricación, como indica la Figura 5.35, es bastante sencillo. Las materias primas (1) se dosifican para ser alimentadas a los tanques de preparación de la pasta (3). Durante el proceso de trituración y manipulación el polvo se recoge en un ciclón (2) para ser también procesado.

Una vez acondicionada la pasta pasa a la fase de conformado (4) para conferirle la geometría y tamaño adecuado.

Posteriormente los paneles entran en un secadero continuo (6) para extraer la humedad. Es en esta etapa donde adquieren la rigidez necesaria. Los vahos, vapores y partículas sólidas arrastradas son conducidos por medio del sistema exhaustor hacia otro ciclón (5) de recogida y recuperación. Finalmente en la estación de calibrado (7) se controlan los productos y se preparan para su expedición.

Debido a la simplicidad de la instalación en los últimos tiempos ha surgido una notable variedad de materiales aislantes fabricados por técnicas semejantes y de prestaciones técnicas similares. Entre ellos cabe destacar los paneles absorbentes acústicos para interiores, como el que muestra la Figura 5.36.

2.9.5. Aislantes de papel reciclado y paja

El papel reciclado se introduce en un pulper donde se desmenuza y se le añade residuos de paja hasta transformarse en una pasta viscosa.

La pasta se vierte en una máquina preformadora donde se evacua el exceso de agua. Cuando los bloques ya tienen consistencia por sí mismos se apilan en una vagoneta y se introducen en un secadero para la deshidratación total. A la salida del secador se cortan en medidas estandarizadas y se hallan listos para su expedición.

El material así descrito se puede usar directamente pero, normalmente se vende una variante que con-

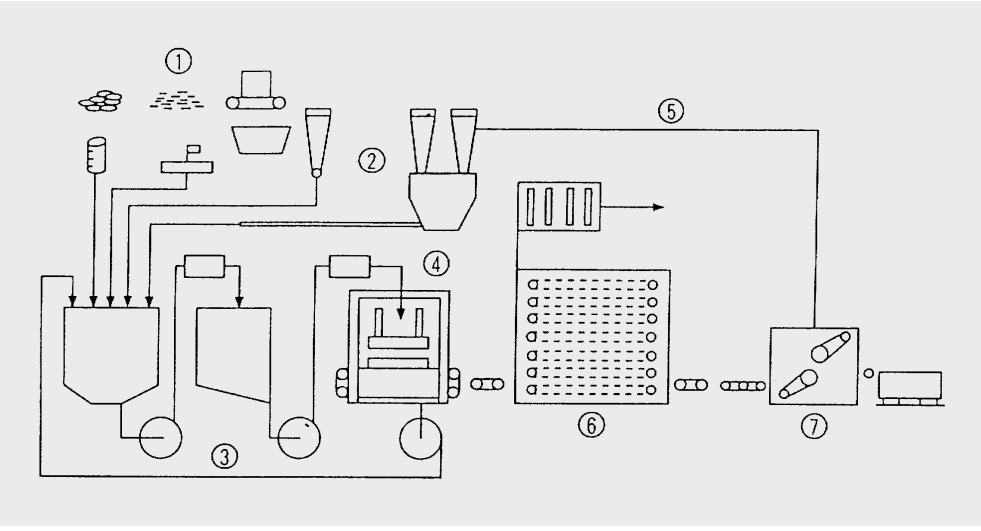


Figura 5.35. Esquema de fabricación de panel aislante a partir de papel usado.

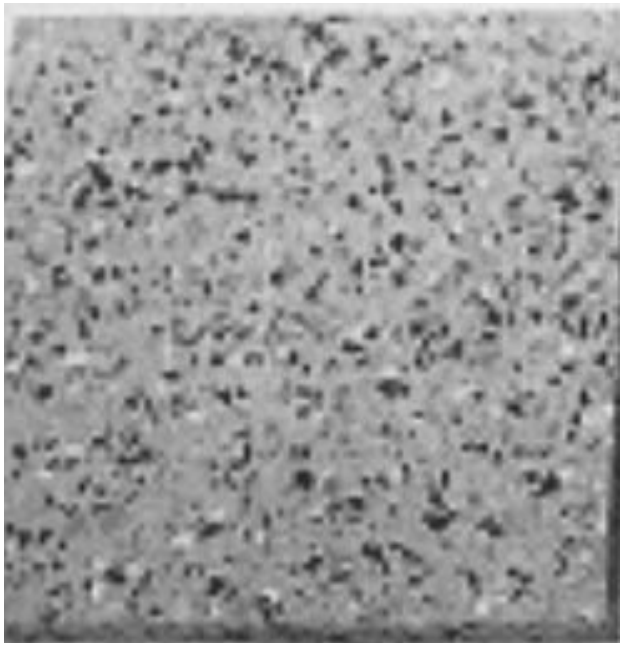


Figura 5.36. Panel aislante de fibra de papel y otros residuos.

siste en añadir una lámina de cartón en una de sus caras, o bien una capa de yeso por una de las caras.

El material tiene un notable coeficiente de aislamiento térmico y, si para su fabricación no se han usado aglutinantes conflictivos, se trata de un producto biodegradable. La Figura 5.37 muestra una planta de producción de pasta a partir de paja.

La planta está provista de dos líneas de producción semejantes para la fabricación de pasta semiquímica de cereales de una capacidad de 200 t/día cada una. La obtención de pasta de celulosa a partir de paja de cereales ha caído en desuso debido a la competencia provocada por la abundancia de papel reciclado como materia prima.

Para la cocción se utiliza sosa en una proporción de un 6,3% en peso sobre pasta seca.

2.9.6. Vegetales no madereros para fabricar pasta

La gran presión ejercida sobre los bosques para la producción de pasta para fabricar papel ha desarrollado nuevos métodos para obtener pastas a partir de vegetales no madereros. China e India van a la cabeza en la producción de pastas no madereras. Existen numerosas especies sustitutas de la madera, así, los rendimientos de la paja de trigo, paja de arroz o bambú se sitúa entre 1,2 y 2 t/ha, mientras que el kenaf o el cáñamo dan rendimientos de 5,7 a 6,7 t/ha, es decir comparables a los que se obtienen de especies madereras tanto blandas como duras.

Dentro de la variedad hay que distinguir:

- Residuos agrícolas y de industrias agroalimentarias. En este grupo se debería incluir la paja de arroz, de trigo o el bagazo.
- Plantas de naturaleza silvestre como el bambú, diferentes tipos de caña, el esparto, etc.
- Plantas procedentes de plantaciones, como el yute, el cáñamo, el kenaf, lino, etc.

Los tamaños de las fibras también son variables y van desde 1 mm para la paja de arroz y kenaf a 1-4 mm para el bagazo, bambú, tallos de maíz o yute y hasta 20 mm para el esparto o el lino.

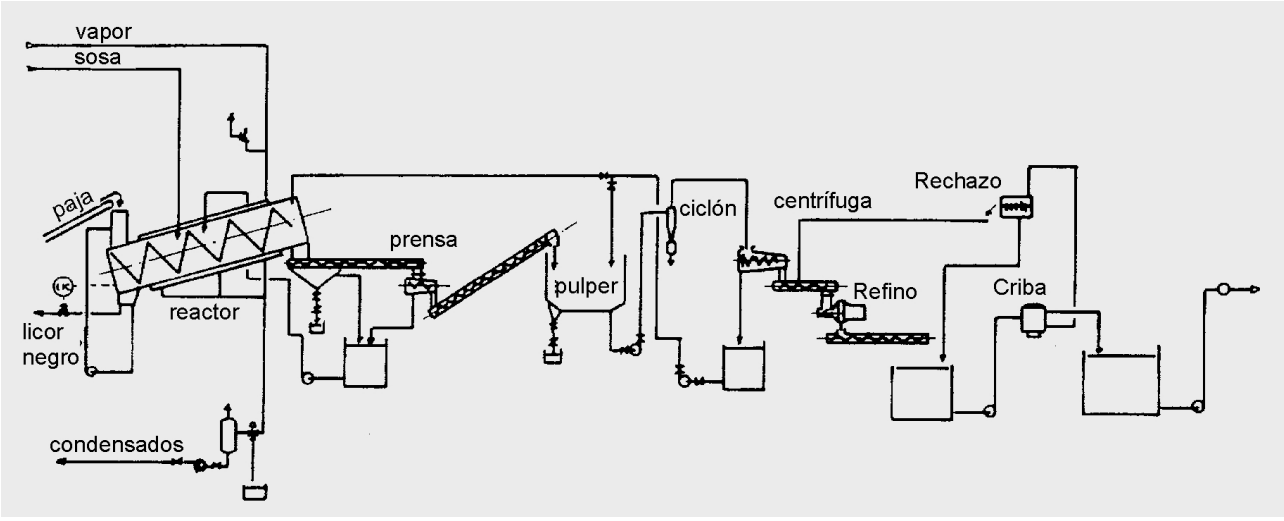


Figura 5.37. Producción de pasta de papel a partir de paja.

El bagazo de caña de azúcar, residuo resultante del prensado de la caña, representa el 2,5% del total mundial de pasta producida y el 18,2% de la pasta obtenida a partir de vegetales no madereros. El proceso consiste en mantener concentraciones de álcali activo de 10 a 12 minutos a 170 ℃.

2.9.7. Producción de celulosa y papel a partir de bagazo de caña

Se pronostica que para el año 2010 la demanda de papel y cartón experimentará un aumento del 50% con respecto al año 1996, por lo que deben considerarse nuevas fuentes para la producción de pulpa virgen. Dentro de estas nuevas opciones hay que considerar las plantas de rotación anual como la caña de azúcar que puede convertirse en una fuente importante de fibra vegetal y celulosa para la obtención de pulpa.

El aprovechamiento del bagazo como materia prima para la obtención de pulpa se ve restringida por aspectos técnicos que limitan su utilización a escala industrial, principalmente la composición variable del bagazo que tiene en la «médula» un componente indeseable que dificulta su procesamiento. La médula es el tejido parenquimatoso central del tallo en el que se mantienen restos de azúcares e impurezas que al fermentar descontroladamente hacen que el almacenamiento del bagazo sea difícil. Esta médula es capaz de absorber hasta veinte veces su peso en un medio líquido mientras que la fibra limpia sólo absorbe unas cinco veces su propio peso, adicionalmente, un mayor contenido de impurezas y azúcares repercute en un mayor consumo de reactivos necesarios para acondicionar la materia prima de cara a la correcta obtención de pulpa de buena calidad. En consecuencia, el desmedulado se convierte en un paso imprescindible para mejorar el bagazo que se empleará en la producción de celulosa y papel de alta calidad.

Las pulpas químicas de bagazo de caña son demasiado oscuras para emplearlas en la elaboración de papeles blancos de calidad y esto se debe a la presencia de lignina residual en la pulpa después del proceso de cocción.

Los polímeros que constituyen el bagazo de caña (celulosa, lignina y hemicelulosa) se deben separar por fraccionamiento y purificar. A partir de la separación de la lignina del resto de los carbohidratos se puede obtener pulpa química con alto valor agregado para el desarrollo de pastas para papel con propiedades innovadoras.

En ensayos realizados en la Universidad Veracruzana de México se observó que las pulpas de bagazo de caña refinadas presentaron un comportamiento similar a la pulpa de madera y se resalta que el proceso de refino se realiza de manera más fácil debido principalmente a una mayor fibrilación de la fracción de fibras largas y cortas en esas pulpas, a la presencia de pentosanos y a la rápida generación de finos como ocurre en las pulpas obtenidas a partir de plantas anuales. Como consecuencia del tratamiento de refinación aplicado a las fibras cortas del bagazo de caña, éstas podrían entrelazar mejor a las fibras largas de madera en la preparación y fabricación de papeles con alto contenido de celulosa de bagazo; este efecto repercutiría en una disminución del consumo de energía neta de refinación y aumentaría la resistencia de este tipo de papel al rasgado y la tensión; y por otro lado las propiedades de drenado (tiempo de drenado y porosidad) disminuyen por la menor cantidad relativa de fibras largas.

En otra línea de investigación relacionada con el aprovechamiento del bagazo de caña en la industria papelera, investigadores del IRD e INRA agrupados en el IRF de Biotecnologías agropecuarias de Marsella (Francia), han desarrollado un proceso biológico no contaminante para el pretratamiento del bagazo. La utilización del hongo filamentoso *Pycnoporus cinnabarinus*, que produce una enzima natural que degrada la lignina, permite reducir a la mitad la energía necesaria para la deslignificación mecánica que se realiza en algunas fábricas de pulpa. Para incrementar la tasa natural de producción de la enzima por parte del hongo los investigadores han encontrado que inyectando etanol gaseoso por convección forzada en la cámara llegan a multiplicar por 45 la producción de la enzima.

Como resultado de estas investigaciones se logra que con un menor costo energético se consigan mejoras de rendimiento de hasta un 12% en la tasa de deslignificación que se traduce en una mejora del 35% en la resistencia mecánica del papel producido. El etanol empleado apenas se consume y permite un acoplamiento con otro reactor para su aprovechamiento posterior evitándose así su emisión a la atmósfera.

2.10. MATERIALES A PARTIR DE FIBRAS Y MADERA RESIDUAL

El sector de la madera, en particular la fabricación de mueble es muy importante y, en consecuencia se

crea un problema secundario con los residuos generados.

El proceso de fabricación varía según el tipo de mueble pero tienen una serie de etapas en común como: secado, maquinado, montaje y acabado. Cada una de estas etapas tiene, obviamente su impacto ambiental. En el caso del secado artificial, las cámaras de secado han evolucionado en gran manera y los únicos problemas ambientales derivan de las emisiones generadas por la caldera que produce el vapor, en particular si se usa una parte residual de la propia madera como combustible.

El maquinado es la etapa que lógicamente genera más residuos ya sea en forma de trozos, virutas, astillas o aserrín. En el chapeado y montaje se pueden desprender COV's y aserrín muy fino mezclado con barnices o pinturas.

Las principales vías de valorización de estos residuos son:

- Combustible. Para un aprovechamiento más respetuoso con el medio ambiente se aconseja la gasificación.
- Materia prima para la obtención de productos químicos (con la misma gasificación antes citada se puede fabricar metanol).
- Fabricación de tableros aglomerados.
- Fabricación de embalajes (palets), tableros o materiales de construcción acabados como el plafón, de la casa Werzalit, que muestra la Figura 5.38.

Los materiales de fibras naturales, principalmente sobre base de madera, se extruyen por presión con una cierta cantidad de polímeros sintéticos y los aditivos necesarios para conseguir la unión entre los constituyentes principales.

En el punto 14 del DVD adjunto se muestran ejemplos de aplicación de residuos de madera con acabados poliméricos.

Los perfiles, de gran rigidez, logran alcanzar módulos desde 4.000 a 8.000 N/mm^2. La Tabla 5.17 muestra algunas características de estos materiales.

Tabla 5.17. Características mecánicas de fibras de madera con otros aditivos

Materia prima	Forma del material	Módulo N/mm^2
60% Fibras naturales madera 20% Almidón (maíz, arroz, ...) 20% Resina natural o sintética	Granulados	1.500-4.000
70-90% Fibras naturales madera 10-30% PP, PE	Granulados.	—
60-70% Aserrín, fibras naturales 10-30% PP, PE	Fibras secas y polvo	2.000-4.000

Finalmente hay que citar una aplicación, cada día más frecuente, que es la fabricación de pelets, o briquetas, de restos de madera para combustible. Para

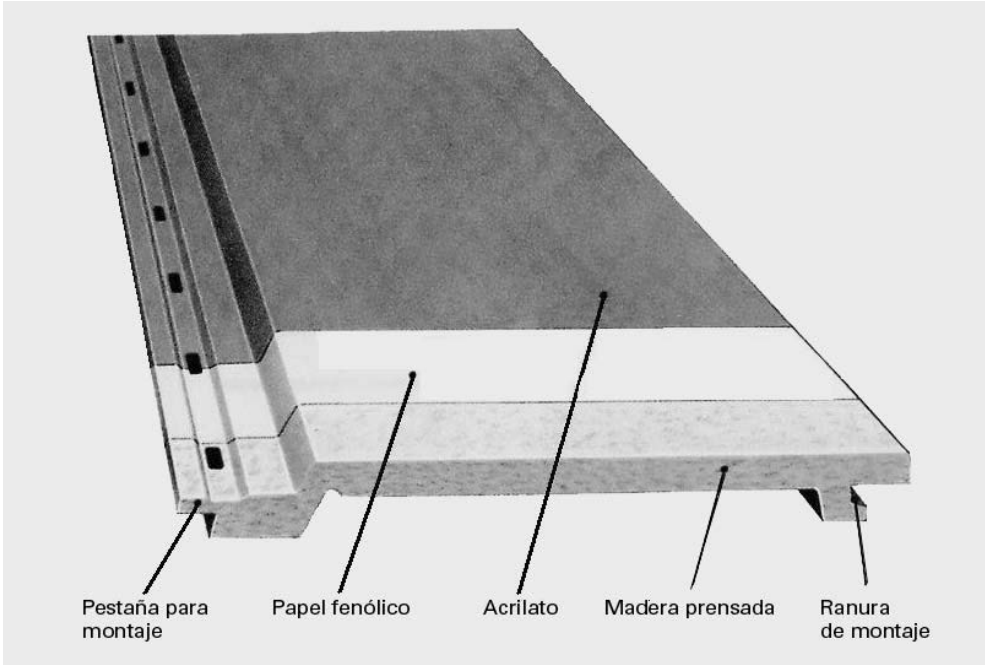


Figura 5.38. Madera prensada con acabado superficial.

ello se precisa una biomasa con una humedad inferior al 15%. Este tema se halla ampliado en el Capítulo 10 de esta obra.

En el punto 15 del DVD adjunto se muestra ejemplos de fabricación de briquetas y del proceso de granulación.

2.10.1. Madera y ciclo de vida

La madera ha sido el material de construcción por excelencia durante miles de años. En los tiempos modernos, por diversas causas, ha retrocedido no obstante en numerosos países sigue al alza y se están creando numerosos diseños para la construcción de viviendas unifamiliares. Las principales ventajas de la madera con respecto a otros materiales de construcción son:

- Es un material totalmente renovable sobre todo si se lleva a cabo una explotación racional del bosque.
- Con el crecimiento de los bosques se absorbe una gran cantidad de CO_2, el principal gas de efecto invernadero.
- Es reciclable, ya que una vez ha llegado al fin de su vida útil y, técnicamente se transforma en un residuo, se puede valorizar de diversas formas. Y, en caso de abandonarse, es un material totalmente degradable.

Los numerosos análisis de ciclo de vida llevados a cabo sobre el empleo de madera como material de construcción en comparación de otros materiales, arroja un saldo claramente favorable, así lo atestigua el estudio «Perfiles medioambientales de materiales de construcción, componentes y edificios» realizado en 2002 por el Instituto Británico de Investigación para la Construcción, comparando 13 parámetros. La Tabla 5.18 muestra el resumen de algunos de los parámetros para la construcción de una vivienda de 220 m^2, usando tres tipos de estructura: viguetas de madera, de metal y de hormigón.

Tabla 5.18. Parámetros comparativos del impacto comparativos de los materiales de construcción

Parámetro	Madera	Metal	Hormigón
Energía (GJ)	255	389	562
Recursos usados (kg)	121.880	138.501	234.996
Calentamiento global (kg CO_2)	62.183	76.453	93.573
Toxicidad crítica a la atmósfera (kg)	3.236	5.628	6.971
Toxicidad crítica al agua (m^3)	407,8	1.413,7	876,2
Residuos sólidos (kg)	10.746	8.897	14.056

Como se desprende de la tabla el único factor desfavorable es la cantidad de residuos, circunstancia nada preocupante ya que se trata de materiales perfectamente reciclables y biodegradables. En caso de estructura al exterior, esta debe ser protegida y la madera y el acero salen penalizados, como indica el apartado siguiente.

2.10.2. Madera impregnada

La imprimación o preservación consiste en incorporar a la madera sustancias químicas para controlar el alimento a los agentes biológicos y/o degradantes prolongando la vida del material. La Tabla 5.19 muestra la clasificación de los diversos preservantes según su naturaleza.

Las creosotas, que se emplean desde tiempo inmemorial, se obtienen de la destilación del alquitrán de hulla, a partir de la coquización a alta temperatura de la hulla bituminosa. El grupo mayoritario, entre el 80-90%, de las creosotas está formado por hidrocarburos aromáticos (antraceno, naftaleno, benceno, etc.). La fracción ácida esta integrada por fenoles, cresoles y naftoles de alto poder fungicida e insecticida. La fracción básica esta constituida por piridinas, quinolinas y acridinas. El sistema de aplicación consiste en preparar un baño caliente de creosota y sumergir la madera a tratar. Tomando las debidas

Tabla 5.19. Preservantes de la madera según su naturaleza

Creosotas	Productos orgánicos	Productos inorgánicos
Creosota ordinaria	Naftenatos	Sales: Arsénico Cobre – Amoniacales Sales: Cupro Cromo – Amoniacales Sales: Cupro Cromo – Bóricas
Creosota líquida	Pentaclorofenol	Compuestos de boro
Mezclas de creosotas	Óxido tributil estañoso	Sulfato de cobre

precauciones el sistema no entraña peligro. Una vez impregnado se deja secar y ya está preparado para su uso. De la efectividad del proceso dan fe las traviesas de ferrocarril o los postes de teléfono que llevan decenas de años y siglos instalados.

Los productos orgánicos incluyen naftalenos, pentaclorofenol y óxido tributil estañoso. Los naftenos son sustancias procedentes de la combinación de ácidos nafténicos, subproductos del refino del petróleo, con sales de elementos metálicos como el cobre o el zinc. Se trata de compuestos cerosos solubles en aceite. El naftenato de cobre es cada vez más usado en la prevención de maderas. Para ello se utiliza una solución al 5%, donde el cobre metálico se encuentra al 0,5%. El pentaclorofenol es, también una sustancia peligrosa que hay que manipular con precaución. El óxido tributil estañoso es incoloro, insoluble en agua y difícilmente lixiviable.

Los productos inorgánicos emplean agua como disolvente. Su principal desventaja es que hinchan la madera recién impregnada, obligando a secar de nuevo. El más empleado es el sulfato de cobre.

Todos los preservantes enumerados son productos químicos tóxicos. El problema sobreviene cuando la madera tratada llega al fin de su vida útil. Tratándose de un material orgánico por excelencia, la madera, el proceso de tratamiento lógico es la valorización energética. En una caldera o en una instalación de incineración equipada con cámara de postcombustión, la incineración de maderas tratadas con creosotas no presentan ningún problema técnico, mientras que cuando se incineran, todas los demás preservantes que contienen metales se deberá instalar un equipo de tratamiento de gases ya que, de lo contrario, los metales serán emitidos a la atmósfera.

En el punto 16 del DVD adjunto se muestra ejemplos de paneles y tablones fabricados con materiales recuperados.

2.10.3. Fibras agrovegetales para reforzar termoplásticos

Durante años las fibras vegetales han despertado un creciente interés como elementos reforzantes de polímeros termoplásticos, debido a su bajo coste, alta resistencia mecánica, baja densidad y notable resistencia a la abrasión. La Tabla 5.20 muestra, en valores medios, ciertos parámetros comparativos mecánicos de diversas fibras.

La inclusión de fibras vegetales, con independencia de su origen conduce a una notable mejora de las prestaciones mecánicas del polímero, en particular los materiales que posean una gran relación longitud/diámetro, como es el caso de la mayoría de las fibras. En los materiales termoplásticos la ganancia de las propiedades mecánicas se ha hecho tradicionalmente a base de la inclusión de fibras de vidrio, de boro o de carbono.

Las fibras vegetales aúnan una elasticidad, resistencia mecánica y ligereza inmejorables al margen de su reclabilidad (hay que tener en mente que las normativas europeas sobre Vehículos Fuera de Uso, obligan a que, a partir de enero de 2006 el 85% en peso de los vehículos debe ser reciclable). También poseen resistencia a la fatiga y al ataque químico. El sector de la automoción, siempre competitivo en costes ha forzado el desarrollo de nuevos materiales ligeros y resistentes.

La estructura de las fibras vegetales se basa en fibrillas de celulosa a lo largo de sus paredes que se encuentran densamente pobladas y empaquetadas formando capas cruzadas. La composición basada en celulosa y lignina, entre otros componentes, es la responsable de la rigidez y resistencia que poseen,

2.10.4. Polipropileno reforzado con filamentos de cáñamo:

En la Unión Europea se producen anualmente importantes excedentes derivados del sector agrícola,

Tabla 5.20. Propiedades mecánicas de algunas fibras

Fibra	Densidad (kg/m^3)	Módulo Young (GPa)	R. tracción (MPa)	Deformación máxima (%)
De vidrio	2.500	80	3,9	5,2
De carbono (IM)	1.750	150	5,5	1,2
De lino	1.400	70	0,85	1,4
De cáñamo	1.480	70	0,8	1,6
De yute	1.460	20	0,5	1,8
De coco	1.250	6	0,25	20
De algodón	1.500	11	0,45	4,0
De kenaf	1.500	53	0,9	1,6

razón por la que se promueve el cultivo de plantas anuales como alternativa a los cultivos tradicionales. Uno de estos cultivos es el del cáñamo (*Cannabis sativa* L.), que tradicionalmente se ha empleado en el sector papelero y textil; aunque últimamente se ha evaluado su potencial como recurso fibroso para el refuerzo en la fabricación de materiales compuestos.

Hasta el momento, los materiales compuestos reforzados con fibras lignocelulósicas se han aplicado a productos que deben soportar cargas mecánicas bajas tales como: revestimiento interior de automóviles, partes internas de cascos de barco, productos para la construcción, mobiliario y productos para el hogar.

En los polímeros reforzados con fibra, éstas sirven como refuerzo, mientras que la matriz tiene la función de transmitir los esfuerzos. Por esta razón, las propiedades mecánicas de los materiales compuestos dependen de la caracterización intrínseca de los componentes individuales y de su adhesión interfacial. Las propiedades mecánicas de las fibras determinan la rigidez y resistencia de los materiales compuestos, mientras que una buena adhesión fibra-matriz es esencial para que las propiedades de los materiales compuestos sean óptimas.

El polipropileno (PP) es uno de los compuestos de mayor uso en la fabricación de artículos para matrices termoplásticas de consumo masivo debido a sus propiedades como: baja densidad, elevada temperatura de ablandamiento, dureza superficial, resistencia a la abrasión y muy buenas propiedades eléctricas. Dado que la fibra de cáñamo es polar y la matriz de PP es no polar se deben emplear tratamientos físicos y químicos para evitar que las polaridades superficiales sean diferentes e incompatibles.

En los recientes trabajos de investigación se ha descrito que la utilización de polipropileno modificado con anhídrido maléico (MAPP) mejora la compatibilización entre las fibras naturales y las matrices olefínicas y potencia la adhesión fibra-matriz en la interfase, lo que mejora significativamente (70%) la resistencia mecánica debido a una mayor adhesión refuerzo-matriz si se compara con compuestos de PP reforzados con fibra de vidrio.

2.10.5. Fibra de fique y plástico

En la búsqueda continua de mejores condiciones, el sector automotriz innova y demanda cada vez más elementos a través de los cuales se puedan alcanzar reducciones en el peso, consumo de combustible y menores índices de la contaminación ambiental aportada a través de los gases de combustión y de los desechos residuales que se generan al fin del ciclo de vida de un automóvil. Con insistencia se buscan materiales más livianos, que resistan las condiciones de operación, que ofrezcan un costo competitivo y que destaquen la protección y confort del pasajero.

En el sector automotriz la tendencia se encamina hacia la fabricación de componentes con materiales reciclables o más respetuosos con el medio ambiente; esto es que proporcionen menores impactos ambientales en relación a los actualmente usados. Por ello, científicos, investigadores y empresas trabajan actualmente en el desarrollo de materiales compuestos, elaborados con resinas termoplásticas, en lugar de termoestables, y con el uso de fibras naturales en lugar de materiales sintéticos. Dichos materiales cumplen las exigencias funcionales y estructurales para su uso en el interior. En este sentido vale la pena resaltar el desarrollo levado a cabo por el ingeniero Gabriel Cadavid, graduado de la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín (Colombia) que se expone seguidamente sobre la valorización del fique.

Para que el material cumpla con las prestaciones mecánicas, físicas y químicas; se deben aplicar diferentes tratamientos a las materias primas para poderse mezclar y homogenizar de la mejor manera.

La fibra de fique se consigue en pacas de 200 kg y una longitud aproximada de 50 cm. Después se corta entre 10 y 15 mm, para tratarla según el diseño de la planta.

A la fibra se le aplica, de entrada, un tratamiento alcalino para remover de su estructura vegetal, en la medida en que sea posible, todos los componentes que no aportan resistencia mecánica y que aumentan el peso del refuerzo, disminuyendo así la resistencia especifica del material compuesto que se desea producir, estos componentes son: la lignina, la hemicelulosa, las pectinas, proteínas y la cera.

Al tratar la fibra con sosa cáustica se maximiza la compatibilidad de la fibra en la interfase facilitando así su acoplamiento debido a que con el tratamiento se logran remover impurezas naturales, artificiales y permite obtener una topografía rugosa en la superficie mejorando la adhesión. Además, el tratamiento alcalino reordena la estructura amorfa de la celulosa a un nivel de mayor cristalinidad proporcionándole así mayor resistencia mecánica.

El material compuesto está formado de polipropileno como matriz, la fibra como reforzante y un aditivo de acople que mejore la interfase química

llamado copolímero de anhídrido maléico y polipropileno (MAPP), el cual es compatible con ambos.

Para realizar una producción industrial del material, se debe separar el proceso químico del mecánico, en dos plantas o fases independientes para evitar problemas de contaminación por infiltración de fibra sin tratar en la parte de integración con la matriz (polipropileno).

La fibra es la clave o el factor fundamental para que el material cumpla las propiedades mecánicas de resistencia a fluencia o impacto, para esto la mercerización, como muestra la Figura 5.39, de la fibra debe estar muy bien fundamentada de acuerdo con los procesos químicos de álcalis para que la fibra no se vuelva rígida completamente.

En el punto 17 del DVD adjunto se muestra un video de fabricación de la fibra de Fique.

Terminado el proceso de mercerización, la fibra pasa a ser neutralizada y secada, por métodos convencionales. Seguidamente se conduce a una reducción mayor de su longitud, para que cuando se integre en la extrusora con el polipropileno ésta no genera atascamientos o puntos flacos de homogenización en el tornillo. Al momento de hacer la mezcla, se realiza un tamboreo inicial con las cargas formuladas, para que luego sea ingresado a la extrusora de manera uniforme. La Figura 5.40, muestra la extrusión del composite.

Finalmente, a la salida de la extrusora, el composite conformado y laminado se corta al tamaño requerido y se conforma en caliente para proporcionar la geometría deseada, como la muestra que reproduce la Figura 5.41.

Figura 5.39. Tratamiento de mercerización de la fibra de fique.

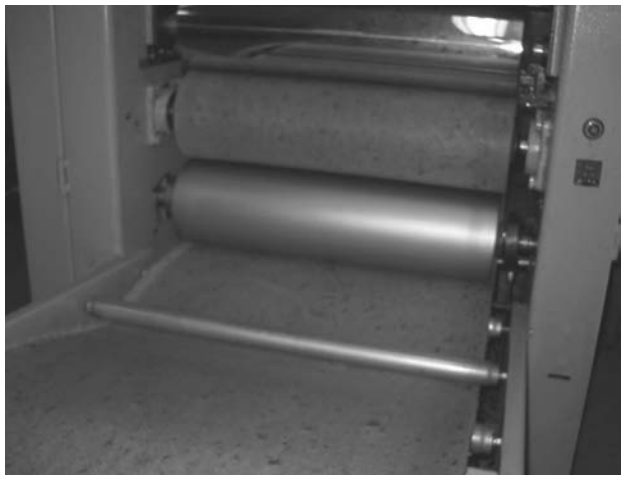


Figura 5.40. Mezcla y extrusión de lámina mediante calandras con temperatura.

Figura 5.41. Corte y moldeo de láminas de composite de fique.

2.10.6. Carbón vegetal

El carbón vegetal es un producto ancestral (lo practicaban los carboneros, a base de «quemar» troncos de árboles), más tarde, en el siglo XIX se industrializó, y se denominó coque, para obtener el combustible fundamental para la incipiente industria del acero. Esta es una de las aplicaciones que en los últimos años ha encontrado una salida para la valorización de los residuos de madera, principalmente retales.

La fabricación de carbón vegetal consiste en pirolizar (fabricar coque) la madera de forma que se seque, elimine parte de los volátiles y aumente de esta manera el porcentaje de carbono. Las proporciones relativas de gases, condensables y coque (también llamado char) varían con las condiciones de operación y con la composición de la materia prima utilizada, dada la diferente proporción de los constituyentes básicos.

En cuanto al producto sólido, cabe distinguir entre el carbón activo y el carbón vegetal. El segundo con aplicaciones fundamentalmente como combustible y de carácter reductor, se obtiene a temperaturas moderadas y sin el empleo de agentes activantes. La pirólisis a niveles térmicos superiores y particularmente en atmósfera de CO_2, vapor de agua o después de un tratamiento químico previo mediante ácidos y sales, conduce a sólidos de alta porosidad y superficie específica, lo que determina su utilización como absorbentes.

Los compuestos volátiles resultantes de la pirólisis de la madera abandonan el horno en forma de gases y vapores condensables. Los segundos constituyen la fracción líquida de la pirólisis, de constitución compleja, con alta representación, fundamentalmente de alcoholes, ácidos y aromáticos, en proporciones que no justifican su recuperación, excepto en el caso de algunos de los componentes mayoritarios de la fase acuosa. La fracción no recuperable puede usarse como combustible con un poder calorífico entre 6.000 y 7.000 kcal/kg.

En el caso de los retales y trozos de madera, la Figura 5.42 muestra el esquema básico de pirolización para su aprovechamiento.

La pirólisis consiste en el calentamiento, en ausencia de oxígeno, de la materia orgánica. Se trata de un proceso endotérmico que según la naturaleza del material a procesar es diferente. Para el caso de los residuos de madera es preferible potenciar la fracción sólida ya que tiene un mercado fácil y los gases y vapores se pueden emplear en la propia industria como combustible, una parte de los mismos se precisa para el mantenimiento del proceso piorolítico.

Existe una fabricación manual, que consiste en colocar los troncos y/o residuos (si es leña se carbonea sin descortezar, excepto en aplicaciones industriales muy grandes, en un tamaño que oscila de 5 a 50 cm, más tarde para homogeneizar el tamaño se emplean cribas) en una fosa, cubrirla con una plancha metálica sobre la que se echa arcilla y encender una parte del mismo permitiendo una mínima entrada de aire. Es obvio que este proceso de fabricación es extremadamente contaminante. Por esto hoy en día se lleva a cabo en reactores cerrados y los gases y vapores pueden usarse para calefacción.

El ciclo de fabricación del carbón vegetal condiciona las propiedades del mismo. En particular el

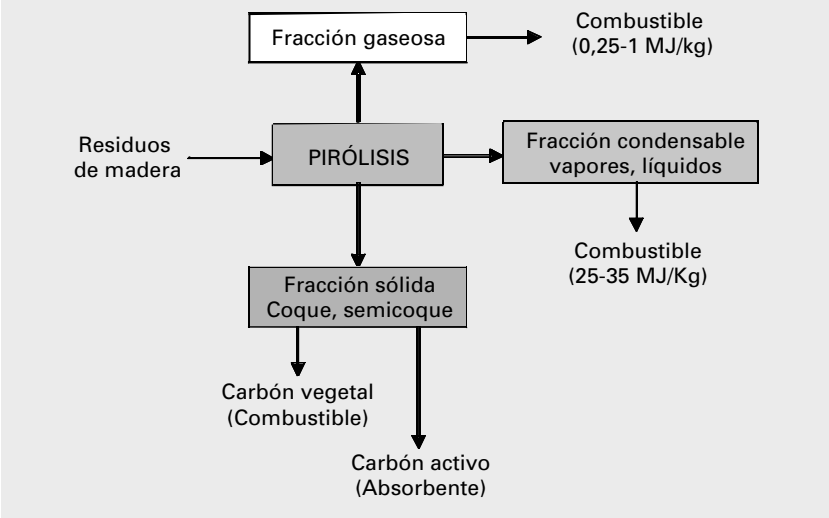


Figura 5.42. Pirólisis de residuos de madera.

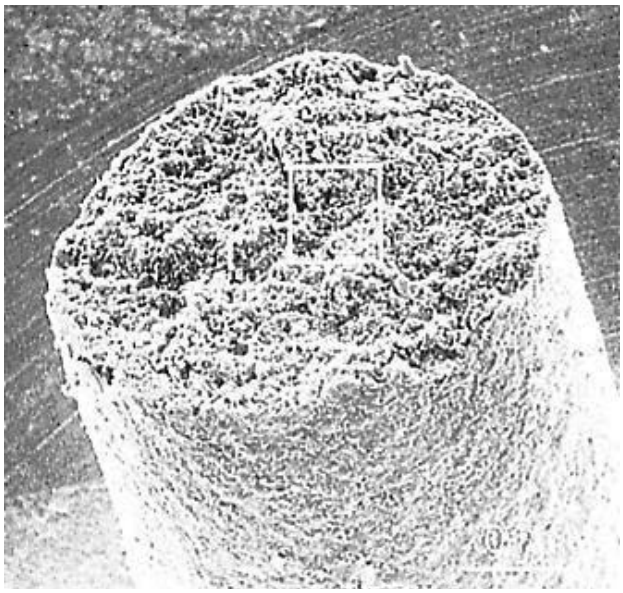


Figura 5.43. Estructura de un carbón activado.

tiempo de carboneo y el tiempo de enfriado. Las características más sobresalientes son:

- PCI alto, comprendido entre 6.000 y 7.000 kcal/kg.
- La densidad del carbón vegetal es una propiedad física bastante importante, sobre todo para su uso energético. Según el tipo de madera usada y la clase de horno, la densidad aparente puede oscilar de 170 a 450 kg/m^3.

2.10.7. El carbón activo

El carbón activo o activado es un material microporoso que se puede extraer de residuos (la cáscara de coco es uno de los más usados, pero también los hay sintéticos como fibras textiles), de ahí que se comente en este apartado. Los carbones vegetales son el primer eslabón para la fabricación de carbones activos. Se escribe en plural ya que existen infinitas calidades de carbones activos que dan lugar a otras tantas aplicaciones.

El carbón activo se caracteriza por tener una gran superficie específica, que puede exceder de 2.000 m^2/g de carbón, y ello proporciona una gran adsorción, gracias a las fuerzas de Van der Waals. El material así obtenido se usa en mascarillas, plantillas para pies, filtros para aguas, filtros para aire acondicionado, material pulverulento adsorbente, filtros para industria química, etc. La Figura 5.43 muestra una foto de un carbón activado.

La característica más importante es la superficie específica. En el caso del carbón vegetal se parte de superficies específicas de 160 m^2/g hasta 400 m^2/g. Como ejemplo representativo de su actividad 1,6 gramos de carbón activo pueden absorber hasta 180 cm^3 de amoníaco.

Existen dos tipos de adsorción:

- Adsorción física o fisisorción, que es debida a las fuerzas de Van der Waals entre sólido y contaminante gaseoso. Si las fuerzas de atracción intermolecular entre el sólido y el contaminante son mayores que las del propio contaminante, éste se concentrará en la superficie del sólido.
- Adsorción química o quimisorción, que se produce como consecuencia de la interacción química del adsorbente y el contaminante, cuya atracción es mucho más fuerte que la anterior, por lo que su desorción es muchas veces inviable, no pudiéndose regenerar el adsorbente.

La adsorción física, en cambio, es un fenómeno reversible, por lo que se puede recuperar o desorber el contaminante adsorbido.

El aspecto fundamental para el funcionamiento es la activación, si se lleva a cabo por primera vez, o regeneración, cuando el carbón ha sido ya usado. En cualquier caso se trata de someter al carbón a una temperatura próxima a los 800 ℃, en ausencia, o con muy poco oxígeno. El calor comienza a volatilizar los compuestos orgánicos depositados (adsorbidos) en el interior de los poros. A medida que salen al exterior son oxidados o destruidos. No obstante la finalidad principal de la regeneración es vaciar los poros para que pueda adsorber de nuevo, es decir volverlo a activar.

En la industria, estos carbones activados se expenden en forma de:

- *Polvo*. Muy usados en la purificación de aguas de la industria alimentaria y farmacéutica. Limpieza de gases.
- *Carbones granulares*. Potabilización de aguas. Tratamiento de aguas residuales. En este caso se precisa una densidad alta.
- *Carbones peletizados*. Generalmente para el tratamiento de aire y gases. También en galvanotécnia y como catalizadores. Filtros para tabaco y tratamiento de agua potable. Eliminación de olores.

En el punto 18 del DVD adjunto se muestran diversos ejemplos de aplicaciones de carbones activos.

La Figura 5.44 muestra una fotografía de una forma de carbón activado paletizado presente en el mercado.

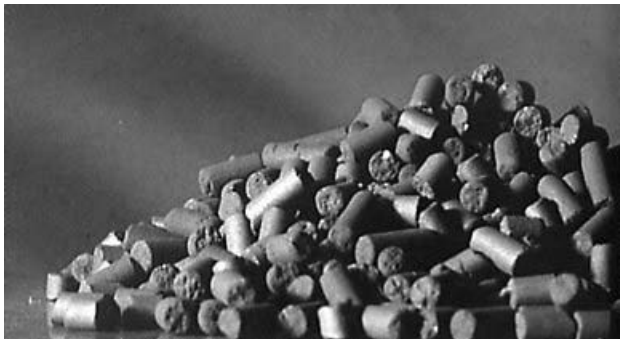


Figura 5.44. Forma comercial de carbón activado peletizado.

2.11. RESIDUOS PROCEDENTES DE OTRAS INDUSTRIAS

El aprovechamiento de residuos industriales es un campo inagotable. En el presente apartado se hace mención, simplemente a dos:

- Uno específico: Las posibilidades de valorización en la industria alimentaria.
- Otro general: La valorización de fangos industriales, como los originados en industrias conserveras, textiles, papeleras, etc.

2.11.1. La industria alimentaria

España es un gran productor de frutas. En el año 2003, produjo más de 1.300.000 toneladas, destinadas tan solo al mercado interno. Se calcula que de esta cantidad cerca del 7% se convierte, en un momento u otro, en residuo, lo que supone un gran potencial de utilización.

2.11.1.1. Biocarburantes

Una salida interesante para residuos de la industria alimentaria es la fabricación de bioetanol, es decir etanol como resultado de la fermentación de los azúcares contenidos en la biomasa. Se trata de un carburante que puede ser utilizado en mezclas o como aditivo de gasolinas (ETBE) en motores de ciclo Otto, y también en mezclas con diesel, en motores de combustión interna. En la actualidad, este tipo de plantas son casi testimoniales ya que la gran producción de etanol se realiza por la transformación de los azúcares contenidos en el almidón del grano de cereal (trigo y cebada), mediante una hidrólisis enzimática y posterior fermentación con el empleo de levaduras, de acuerdo con la reacción general:

$$\text{Almidón} \xrightarrow{(+\text{ enzimas})} \text{Glucosa} \xrightarrow{(+\text{ levaduras})} \text{Etanol} + CO_2$$

El etanol puede usarse como único combustible o en mezclas con la gasolina. En algunos países se prefiere utilizar el etanol después de transformarlo en etíl terciario butíl éter (ETBE), que es una alternativa al MTBE (metil terciario butíl éter) que se fabrica a partir del petróleo. En 2004, España era el líder de la UE en fabricación de etanol con 180.000 toneladas. Sin embargo, España sólo llegó al 0,8% de sustitución de carburantes en 2005, incumpliendo la Directiva 2003/30/CE relativa al uso de biocarburante que imponía una cuota del 2%.

España es uno de los mayores productores mundiales de aceite de oliva. Éste una vez convertido en residuo se puede transformar en biocarburante alternativo al gasóleo. Con referencia al biodiesel, biocarburante fabricado a partir de aceites y grasas vegetales y también animales, vale la pena añadir que el término biodiesel se aplica a los ésteres metílicos obtenidos por la transesterificación metílica de los aceites y grasas, la reacción básica es:

$$\text{Grasa/aceites} + \text{Alcohol} \rightarrow \text{Ester (biodiesel)} + \text{Glicerina}$$

Aproximadamente por cada unidad de éster se obtiene un fracción (un 10%) de glicerina de calidad farmacéutica. Los diferentes tipos de biodiesel se diferencian por los diversos tipos de cultivos y los más comunes son:

- FAME (*fatty acids methyl ester)* éster metílico de ácidos grasos, que incluye diversas clases de aceites y grasas animales y vegetales, así como sus mezclas.
- FAMAE (*fatty acids mono alkyl ester)* éster monoalquílico de ácidos grasos, que admite la sustitución del metanol por otro alcohol en la transesterificación.
- RME (*rapeseed oil methyl ester)* éster metílico de aceite de colza.
- SME (*soya/sunflower methyl ester)* éster metílico de aceite de soja o girasol.

Se pueden hacer mezclas desde el 70% de biodiesel y 30% de gasóleo convencional hasta el 5% de biodisel, básicamente por la escasez actual de biocarburante.

2.11.1.2. Energía a través de residuos agroalimentarios

Otro sector importante, fuera de nuestras fronteras, es la industria cafetera. Una vez recogido el grano, se parte la cáscara y aparece un importante recubrimiento oleaginoso, muy contaminante, que se lava y, habitualmente se vierte sin control El grano resultante, propiamente el grano de café, se seca (al sol o artificialmente) y más tarde se torrefacta.

Una variante es la fabricación de café descafeinado que genera una gran cantidad de residuo «marro de café» con una humedad del 75%. Para proceder a la valorización energética, debe realizarse un secado previo hasta una humedad del 20%. La energía procede del propio sistema (el ejemplo está extraído de la realidad y procesa 40.000 t/año de marro de café) y después se obtienen 7 t/h de vapor para la propia industria. La Figura 5.45 muestra un esquema del proceso de valorización energética.

El marro húmedo se introduce en el secador tipo flash de barrido (El secado es una etapa crítica ya que el marro de café es un producto inflamable y explosivo), donde el tiempo de retención de sólidos es inferior al minuto y la energía proviene de los gases calientes procedentes de la cámara de combustión, en este caso una cámara torsional. Se trata de una cámara cilíndrica de eje horizontal, cuyas paredes (de hecho las paredes de la cámara torsional son tubos membranados por el interior de los cuales circula agua. De esta manera, la instalación carece de refractarios) y tornillo transportador están refrigerados por agua, es un reactor muy adecuado para la incineración de sólidos pulverulentos y celulósicos de reducida granulometría, como es el caso del marro de café.

El agua que refrigera las paredes de la cámara torsional y los conductos, se hace recircular hasta reducir la temperatura de los gases a 500 ℃, para entrar en el secadero, sirven para generar vapor a 16 bars. Finalmente los gases, a una temperatura de unos 100 ℃, pasan por un ciclón para separar una pequeña cantidad de polvo (restos de marro sin quemar y algo de ceniza) antes de ser evacuados a la atmósfera.

2.11.1.3. Materia para adicionar a la cerámica

La industria de la remolacha, que produce azúcar, genera un residuo denominado EVO (extracto vegetal orgánico) que no es más que un concentrado de remolacha sin azúcar. El análisis racional concluye que tiene un 72% de materia orgánica y un 28% de cenizas. El PCI es del orden de 4.200 kcal/kg. Es decir, un buen complemento para la adición a una arcilla de interés cerámico para la fabricación de cerámica estructural. Su adición no puede ser superior al 5%, sobre el peso de arcilla ya que la energía que desarrolla la fracción orgánica por un lado y la presencia de álcalis, aportados por el propio residuo, provocan una fusión prematura del material. Ello significa que la cerámica puede cocerse a menor temperatura con lo que hay un ahorro de energía.

Además, como que el EVO es líquido, se mezcla perfectamente con la arcilla y hay un ahorro de agua en la etapa de conformación. El calor desarrollado en el interior de la masa cerámica está muy bien distri-

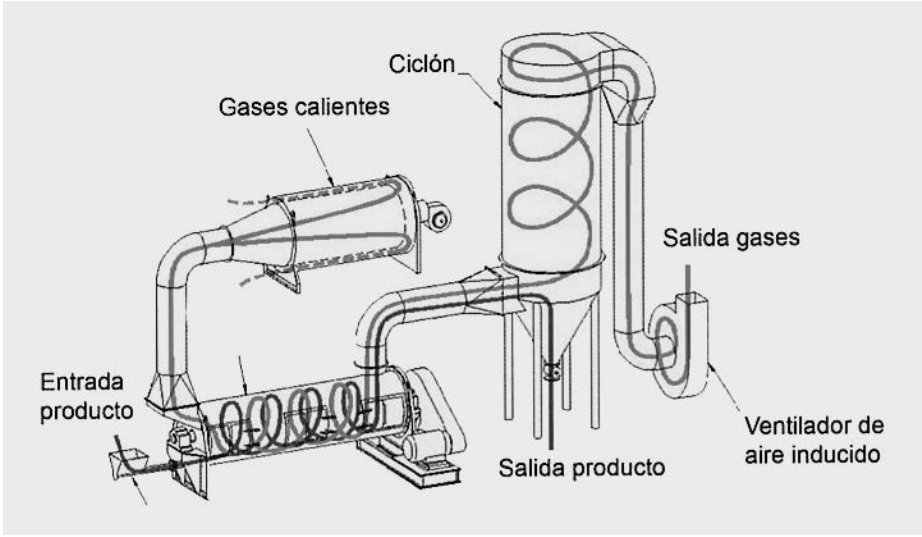


Figura 5.45. Valorización energética del marro de café.

buido, lo que supone una formación de poro (en el interior de la matriz cerámica) más reducido o, un material cerámico más resistente a la helada y no produce ningún tipo de eflorescencias ni velos. Una ventaja adicional es que la reducción de combustible fósil redunda en una disminución de la emisión de CO_2 procedente del combustible convencional.

2.11.1.4. Material para la construcción

En muchos lugares del mundo sigue fabricándose viviendas de adobe, término que proviene del vocablo árabe «attub», que significa ladrillo secado al sol y hay constancia histórica de su existencia 9.000 años a.C., como lo atestigua la muralla de Jericó en Palestina.

De manera genérica se puede definir el adobe como aquel material de «barro» sin cocer al que se añade una materia orgánica, de ahí el interés de insertarlo en esta obra. Para aumentar la resistencia mecánica se «arma» con fibras vegetales y, con frecuencia, con refuerzos de bambú o cañas secas que hacen las veces de armazón. La Figura 5.46 reproduce una bonita casa de adobe.

El desarrollo de materiales y composiciones para la óptima fabricación de adobes ha sido objeto de exhaustivos estudios en universidades pertenecientes a países poco desarrollados económicamente pero con personal cualificado y circunstancias climatológicas adversas, por su pluviosidad, como puede ser el caso de Cuba. Hay que tener en cuenta que, en la actualidad hay 1.500 millones de personas que habitan en viviendas de esta naturaleza.

Figura 5.46. Casa de adobe con refuerzos de residuos vegetales.

La norma peruana E-0.80, establece una primera clasificación de adobes:

- Adobe simple, constituido por unas adecuadas proporciones de arcilla, arena, fibra orgánica y agua.
- Adobe estabilizado donde, dada la escasa resistencia mecánica del adobe simple como material de construcción frente a la humedad, se añade algún producto, denominado estabilizante para mejorar esta propiedad.

El papel, como elemento residual empleado, para la fabricación de adobe mejora la resistencia a la compresión al aglomerar las partículas de todos los componentes (en particular si la arcilla empleada carece de mineral de arcilla de naturaleza plástica). Lleva a cabo la misión de mineral de arcilla, demanda menos agua para el amasado y, por tanto mantienen las contracciones en secado dentro de unos límites reducidos, dando mayor estabilidad mecánica al material en servicio.

La misión del aglomerante es diferente ya que además de aumentar la resistencia a la compresión su función es minimizar la absorción de agua, a base de sellar los huecos presentes entre el conjunto de materiales que integra el adobe. Por lo general, si la cantidad de materia orgánica supera el 25% en volumen, la resistencia a la compresión desciende por debajo de 1 MPa.

Partiendo de una arcilla de interés cerámico convencional: 60% de material arenoso, 15% de limo y 25% de mineral de arcilla, los expertos aconsejan partir de composiciones volumétricas suelo (arcilla)/materia orgánica (usando trozos de caña de azúcar) de 4/1. Como estabilizantes se han empleado cal hidratada, melaza (miel de caña de azúcar). Este estabilizante se comporta mucho mejor que el hidróxido de calcio. Un 3% de melaza proporciona unos resultados excepcionales.

Una variedad de adobe muy usada en Venezuela son los bloques de tierra-cemento-sisal. El sisal es una variante de cacto del que se obtiene la semilla de ágave, el resto se desfibra para usarlo como elemento de refuerzo. Como todo adobe encuentra limitaciones en ambientes húmedos, por esto suele rebozarse con mortero para evitar infiltraciones de agua. La cantidad de cemento suele ser muy baja, del orden del 5%.

Según las solicitaciones a que el bloque haya de ser sometido, se arma con una o dos barras de acero. Los bloques suelen tener unas dimensiones de $10 \times 20 \times 40$ cm.

2.11.2. Valorización de fangos industriales

Por tratarse de residuos de naturaleza compleja y proceder de diferentes industrias se incluye, de manera genérica, en este capítulo. Además se trata de residuos que se generan en grandes cantidades y es conveniente explorar nuevas vías de valorización.

Las alternativas que se plantean para la recuperación y reutilización de los fangos de depuradora, hay que entender depuradoras industriales, se adecuan a la tendencia comunitaria de reducción y reaprovechamiento de los fangos. Estas alternativas son:

- Recuperación de energía mediante la conversión termoquímica del fango en otros compuestos de fácil manejo. La más respetuosa de estas tecnologías es la gasificación. Para ello se oxida una parte pequeña del combustible, en un reactor de lecho fluidizado, que genera calor suficiente para descomponer el resto del fango. El producto resultante de este proceso es un gas combustible que, una vez lavado, es apto para los motores de combustión interna y externa.
- La digestión anaerobia es muy utilizada para la producción de metano (biogás apto para la producción de energía), lo que facilita la disponibilidad de energía para el posterior secado de fangos. La digestión anaerobia se potencia mediante unos procesos previos a la digestión: el tratamiento por ultrasonidos y una centrifugación especial.
- La recuperación de minerales mediante la «fusión de fangos» procedentes de las cenizas de las incineradoras que contienen metales pesados. Estas cenizas se vitrifican en una cámara a 1.400 ºC (lo que estabiliza y reduce el volumen) y posibilita su posterior reutilización en la construcción a base de incorporar estos productos inertes a masas de hormigón (cemento, vidrio, cerámica, escoria cristalizada, etc.).
- Otro proceso de valorización es la ceramización que se amplia más adelante.
- El compostaje de fangos para añadirlos a mezclas de suelo para su utilización en la jardinería urbana. Una tecnología prometedora en esta línea es el vermicompostaje, es decir, el uso de lombrices de tierra para degradar los fangos no tratados, convirtiéndolo en un material inodoro, muy similar al humus y con gran contenido de nutrientes.
- Recuperación de espacios degradados: aplicación a la regeneración de suelos desestructurados o agotados. El Banco Europeo de Desarrollo financiado por el Programa de Asistencia Técnica Medioambiental promociona estudios para la reutilización de suelos gracias a la silvicultura.

2.11.2.1. Generalidades y caracterización de fangos

Las aguas residuales procedentes de la industria y de las ciudades deben ser depuradas antes de ser vertidas en los ríos o al mar. La depuración genera una cuantiosa cantidad de fangos cuya calidad y cantidad dependen del sistema de depuración empleado.

Para llevar a cabo un tratamiento de fangos, debe conocerse el alcance de los principales parámetros de los fangos y su importancia sobre el tratamiento posterior, como el que se especifica en la Tabla 5.21.

Respecto a la eliminación y/o reutilización de fangos, en la actualidad se practican diversos métodos bien diferenciados, si bien conceptualmente se pueden agrupar en dos:

- *Procesos de eliminación*: como el depósito en vertederos controlados o la incineración, si bien en este último caso se recupera energía.
- *Procesos de valorización*, donde se recupera total o parcialmente el fango.

Hay que advertir que la gran asignatura pendiente en la generación de fangos es la minimización y la reutilización del agua depurada, en particular en la industria.

La Figura 5.47 muestra que, aparte de las zonas que representan el vertido, todas las demás alternativas, con mayor o menor éxito, corresponden a la valorización (Esta parte se desarrolla ampliamente en el Capítulo 12 de esta obra).

2.11.2.2. Transporte y depósito en vertederos

Con la limitación impuesta por la Directiva sobre vertido, se tendrán que desarrollar vías alternativas a este sistema de eliminación, sobre todo si se tiene en cuenta que en un futuro muy próximo habrá más depuradoras funcionando tanto en el terreno municipal como industrial.

En un futuro no muy lejano la extensión de la obligación de depurar aguas residuales en todos los

Tabla 5.21. Tratamiento de fangos

	MÉTODO DE TRATAMIENTO												
		ESTABILIZACIÓN											
PARÁMETRO	Sedimentación	Aerobio	Anaerobio	Químico	Térmico	Espesor	Deshidratación	Secado	Transporte	Vertedero	Compostaje	Agricultura	Incineración
Temperatura		X	X									X	X
Densidad.						X		X	X				
Propiedades reológicas.							X	X	X	X		X	X
Sedimentación.	X					X	X						
Concentración de sólidos.	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Sólidos volátiles.		X	X	X	X				X	X	X	X	X
Digestabilidad.		X											
PH.		X	X	X			X				X	X	
Ácidos volátiles.			X										
Aceites y grasas.		X	X									X	
Metales pesados.			X							X	X	X	X
Nutrientes.		X	X								X	X	
Tamaño partícula.	X						X	X					
Poder calorífico.													X
Lixiviación.										X			

municipios y el tratamiento terciario, supondrá un importante incremento de la generación de fangos.

Vertido al mar: este sistema de eliminación, muy utilizado por países como Portugal, España y Gran Bretaña, quedó prohibido en 1999 debido a la contaminación que provocaba en los alimentos marinos y al hecho de tratarse de un sistema de vertido incontrolado cuyos efectos a medio o largo plazo son imprevisibles.

2.11.2.3. Incineración y otros tratamientos términos

Este sistema es muy utilizado en países como Francia, Austria, Dinamarca y Suiza, sobre todo para los fangos municipales.

En los últimos tiempos se han desarrollado otros métodos de tratamiento térmico, como la gasificación, que reducen el impacto ambiental y mejoran las tasas de valorización.

2.11.2.4. Aplicación en tierras de cultivo

Es el sistema más económico y permite la reutilización de los fangos activados como abono para la agricultura por la cantidad de nutrientes importantes para las plantas (N y P) pero existe un peligro por su potencial de eutrofización para las aguas superficiales y subterráneas (ya que favorecen la proliferación de algas). La directiva europea especifica un tercer proceso de eliminación para los nutrientes.

No obstante, hay muchos imponderables que no facilitan su aplicación. El contenido de metales pesados (Zn, Cu, Ni, Cd, Pb, Hg, Cr, etc.) de los fangos aumenta el nivel de estos contaminantes a una concentración mayor que en estado natural, lo cual su-

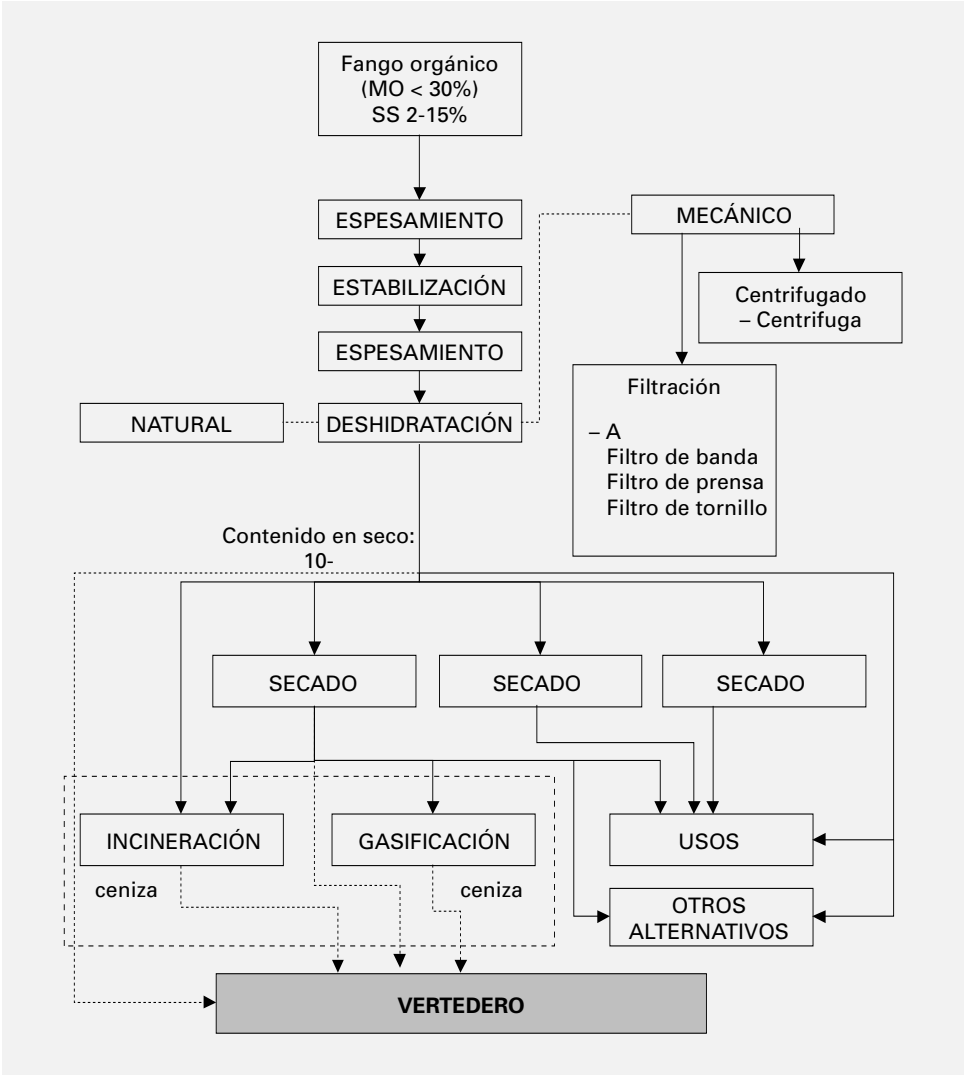


Figura 5.47. Gestión de fangos

pone que los suelos agrícolas queden impregnados de estos elementos con carácter permanente y cambien su pH de manera irremediable. La consecuencia final es un campo no apto para la agricultura. Se prevé que con la concentración traza actual del suelo, el uso de los fangos de depuradora se puede alargar unos 70-80 años hasta que éste alcance la cuota permisible de metales pesados.

De estos metales pesados, el zinc, el cobre y el mercurio son los principales elementos que limitan el reciclado de fangos, mientras que el cadmio suscita problemas específicos debido a su toxicidad y a su movilidad variable. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es la principal propiedad del suelo que controla la retención y la toxicidad de los metales en un suelo tratado con fangos. La CIC depende del pH, del contenido de materia orgánica y de la textura del suelo. La capacidad de absorción de las plantas depende de las propiedades del suelo (menor en suelos alcalinos) y de las prácticas agrícolas.

Respecto a los contaminantes orgánicos (plaguicidas, disolventes industriales, colorantes, plastificantes, agentes tensoactivos, etc.), generalmente con poca solubilidad en agua y elevada capacidad de adsorción, tienden a acumularse en los fangos. La característica principal es su variado potencial de biodegradación lento, pero significativo. Lo cual se puede producir en la propia estación depuradora, en el suelo una vez aplicados los fangos y durante el compostaje.

Los agentes patógenos no hay que descartarlos ya que pueden poner en peligro la salud humana y animal. Por ello, antes de utilizar los fangos es necesario neutralizar la acción de estos agentes patógenos.

2.11.2.5. Potencial energético de algunos fangos

Los fangos conteniendo materia orgánica, poseen un potencial energético susceptible de ser aprovechado por vía térmica en procesos de combustión, gasificación o pirólisis. Del potencial energético de los residuos sólidos, el parámetro más indicativo es el poder calorífico inferior (PCI). Éste puede estimarse a partir del análisis elemental, del contenido de inertes y de la humedad del residuo. Teniendo en cuenta únicamente el material combustible:

$$PCI = [339{,}6\ C + 1.193{,}9\ H - 177{,}4\ O + 94{,}2\ S]\ (kJ/kg_{res.\ seco\ sin\ cenizas})$$

Como puede observarse, el poder calorífico aumenta con el contenido en carbono e hidrógeno y disminuye con el contenido de oxígeno orgánico. El poder calorífico de fangos de origen municipal se cifra en 4.500 a 5.300 kcal/kg_{MV} (18.800 a 22.200 kJ/kg_{MV}) siendo del mismo orden que los residuos ligno celulósicos. Para los fangos digeridos, el poder calorífico oscila entre 1.400 y 3.000 kcal/kg_{MV} (5.800 a 12.500 kJ/kg_{MS}).

En un horno de incineración el fango suele introducirse con un contenido de humedad próximo al 50%, básicamente debido a problemas de sobrecalentamiento de las parrillas o de fusión de los áridos del lecho en el caso de tratarse de lechos fluidizados.

La utilización de los pelets resultantes del secado térmico como materia prima para plantas gasificadoras resulta muy atractiva ya que la componente orgánica de este material está alrededor del 50%. La gasificación de esta materia permite la instalación de motogeneradores que aprovechan el gas resultante.

El destino de fango seco a gasificación implica una reducción de costes en la gestión del fango frente a alternativas de vertedero y es más válida medio ambientalmente ya que se aprovecha su potencial energético y se alarga la vida útil del vertedero.

2.11.2.6. La valorización cerámica de fangos y lodos

Los materiales cerámicos son, básicamente, compuestos de silicatos aluminosos con presencia de otros minerales como el cuarzo, el feldespato, la calcita, etc. A partir de estas materias primas se prepara una pasta plástica que permite el conformado. Previo secado y posterior cocción a alta temperatura, unos 1.000 ℃, se obtienen los materiales cerámicos.

La introducción de fangos como materia prima secundaria resulta muy atractiva porque los materiales cerámicos disponen de una gran capacidad inertizadora de metales pesados. Una parte de las arcillas cerámicas junto con los fangos, en proporciones habitualmente situadas entre el 10 y el 20%.

Los materiales cerámicos están constituidos microestructuralmente en cuatro fases: materias cristalinas, productos recristalizados, matriz vítrea, productos de reacción de fangos, especialmente los metales. Estos, en el proceso son embebidos en la fase vítrea (inertizados) en su mayor parte mientras que los componentes orgánicos son destruidos térmicamente dando lugar finalmente a la formación de la estructura porosa.

2.11.2.7. Sobre los productos resultantes y la valoración ambiental del proceso productivo

En los procesos de valorización cerámica, en el amplio abanico de posibilidades que los actuales materiales de construcción brindan se hace necesario considerar y evaluar las características de los productos resultantes y la valoración ambiental del proceso. Aun cuando la introducción de los fangos en los procesos de ceramización no constituye una incineración de los mismos sí que supone un proceso de pirólisis térmica que debe ser convenientemente estudiado ya que de otro modo se corre el riesgo de eliminar un problema ambiental para crear otro. En este sentido deben extremarse los medios para garantizar la calidad ambiental del producto para el usuario así como del proceso productivo en sí mismo.

De la experiencia acumulada se sugiere, dada la extensa cantidad de tipos de fango existentes, un estudio detallado del producto fabricado:

- Características y posibles patologías.
- Comportamiento frente a los fenómenos de lixiviación.

En el proceso productivo:

- Emisiones de COV's durante la manipulación y secado.
- Emisiones gaseosas (inorgánicas y COV's) durante la cocción cerámica.
- Balance másico.

Las Tablas 5.22 y 5.23 reproducen los resultados de los análisis de emisiones gaseosas para un proceso de ceramización correspondiente a una composición del 70% de arcilla (arcilla roja del Vallés, Barcelona) y un 30% de fangos procedentes de la industria textil. Hay que hacer mención al hecho de que las arcillas naturales ya contienen una cantidad de elementos contaminantes, básicamente, de naturaleza inorgánica.

2.11.2.8. Consideraciones energéticas

Los costes de elaboración de un producto de cerámica estructural se pueden desglosar en un 25% correspondiente a la materia prima, un 25% de costes energéticos y un 50% de amortización y costes laborales (producción y comercialización). En general, la introducción de fangos en matrices cerámicas tiene aspectos positivos energéticamente.

Desde la perspectiva energética se pueden aportar con carácter general las siguientes ventajas:

- Concentración puntual de calor en el interior de la pieza a cocer, que supone una mejora de la transferencia de calor.
- El poder calorífico inferior (PCI) de los fangos biológicos que aproximadamente se sitúan sobre las 3.400 kcal/kg.
- El ahorro energético durante la cocción cerámica es muy importante en función de la presencia de materia combustible en la matriz cerámica aportada por los fangos. Sin embargo, la necesidad de depurar los gases mediante un *scrubber* y eventualmente el filtrado de olores hace que en definitiva este resultado se reduzca a un valor final no superior al 10%.
- Ahorro del consumo de agua toda vez que esta es aportada por el elevado porcentaje que contienen los fangos (en promedio del 70%).

Tabla 5.22. Niveles de contaminantes orgánicos emitidos durante el proceso de ceramización

Contaminante	Intervalo temperatura (°C)	Nivel de emisión mg/Nm³	% Oxígeno	Nivel de emisión (11% oxígeno) mg/Nm³
Partículas sólidas en suspensión	20-1.060	37,0	20,3	529
Dióxido de azufre	20-500 500-1.060 1.060-1.060	1,70 2,20 11,30	20,5 20,1 20,0	34,0 24,4 113
Cloruro de hidrógeno	20-50 500-1.060 1.060-1.060	2,02 1,68 0,60	20,5 20,1 20,0	40,0 18,6 6,0
Fluoruro de hidrógeno	20-1.060 1.060-1.060	0,058 0,008	20,3 20,0	0,83 0,08
Óxidos de nitrógeno (ppm NO_2)	20-500 500-1.060 1.060-1.060	2,8 7,6 8,9	20,5 20,1 20,2	56 84 111
Metales				
Pb		<0,02		—
Ni		0,02		0,29
Zn		0,028		0,40
Cu		<0,004		—
Cr		0,043		0,61
Mn	20-1.060	0,005	20,3	0,07
Cd				—
Sb				
Ti				
As				
Co		<0,004		—
V		<0,02		—
Sn		<0,02		—

Tabla 5.23. COV's emitidos durante el proceso de ceramización

Familia	Compuesto	30% fango (µ/m³)	100% arcilla (µ/m³)	TLV-TWA (µ/m³)	Nivel detección de olor (µ/m³)
Organoclorados	Percloroetileno	2,1	n.d.		
	Clorodifluorometano	194	n.d.		
	Triclorofluorometano	88	592	5.620	
	Diclorometano	307	n.d.	174.000	
	Tricolometano	n.d.	940		
Sulfuros	Sulfuro de carbono	n.d.	143	31.000	1.306
	Disulfuro de dimetileno	2,1	n.d.		7
Ácidos alifáticos	Ácido acético	6,3	n.d.	25.000	182
	2-metilo propanoico	n.d.	n.d.		
Esteros alifáticos	Acetato de metileno	n.d.	n.d.	606.000	
Terpenos	A-pine	n.d.	24,5		
	Limonedo	5,2	n.d.		
Hidrocarburos alifáticos lineales	N-pentano	92	n.d.		
	N-hexano	22	n.d.		
	N-decano	8,3	37,3		
	N-undecano	1,0	37,3		
	N-tridecano	2,1	n.d.		
	N-tetradecano	4,2	n.d.		
	N-pentadecano	6,3	n.d.		
Aromáticos monocíclicos	Benzeno	n.d.	93	32.000	194.712
	Tolueno	60	182	188.000	6.024
	Etilbenzeno	6,3	n.d.	434.000	2.602
	M+p-chileno	52	22	434.000	86.757
	O-chileno	7,3	n.d.		86.757
Nitrilos aromáticos	Benzonitrilo	4,2	n.d.		

3. Sustratos y soportes

Los sustratos son materiales inertes y porosos que se añaden al suelo como base para la aportación de agua y los elementos nutrientes disueltos en ella. En términos agrícolas un sustrato es un portador de nutriente. El caso más conocido y representativo es la turba (su extracción hace años está prohibida en toda la UE), variedad de carbón natural procedente de la putrefacción y degradación de la materia orgánica debido a la acción del agua.

El soporte es el acumulador de líquido. Para acumular líquido es imprescindible una frondosa estructura capilar. En este caso es preciso que la porosidad sea abierta para que el líquido pueda entrar, quedar retenido y ser liberado cuando la planta así lo requiera. Ejemplos típicos de soportes son la perlita (roca volcánica silicea que al ser triturada y calentada a cierta temperatura genera una gran porosidad) y la vermiculita (mineral de estructura laminar próxima a la

mica) expandida a unos 900 ℃. Durante la expansión el agua contenida en sus láminas sufre una brusca evaporación creándose una tupida red capilar.

Una enmienda orgánica es un producto que actúa sobre las características fisicoquímicas y biológicas del suelo o del agua de riego. Las principales enmiendas orgánicas son:

- Enmiendas húmicas sólidas.
- Ácidos húmicos líquidos.
- Compost.
- Turba.

El suelo, de interés agrícola, se compone de materia mineral, en forma de partículas de tamaño, composición mineralógica y química variadas. Además, obviamente hay materia orgánica, la denominada capa vegetal y agua. La Figura 5.48, muestra el cuadro de clasificación de los suelos (por lo que hace referencia a la fracción inorgánica).

En términos generales, se puede afirmar que un suelo de interés agrícola está constituido por:

- 45% de materia mineral.
- 5% de materia orgánica.
- 50% de agua y aire.

La materia orgánica en suelos puede agruparse en dos categorías:

- Materia orgánica no humificada, como la biomasa vegetal y la biomasa microbiana.
- Humus, como los materiales orgánicos sencillos (azúcares y aminoácidos) o los de cadena larga (polisacáridos y proteínas) y las sustancias húmicas (humus en sentido estricto).

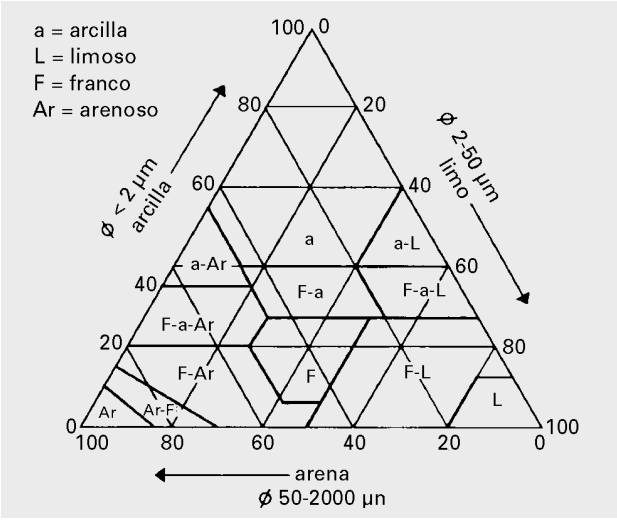


Figura 5.48. Clasificación de los suelos.

Las sustancias húmicas se caracterizan por no presentar características físicas y químicas específicas, tales como composición química determinada o punto de fusión concreto. Son de color oscuro, con carga negativa, de carácter ácido, predominantemente aromáticas y de elevado peso molecular. Son compuestos relativamente oxidados.

El término humus se utiliza en sentido amplio, para indicar las sustancias orgánicas que resultan de los procesos de humidificación (descomposición, degradación y síntesis). De hecho puede definirse como un constituyente de la fase sólida del suelo, formado por biomoléculas (compuestos de estructura molecular definida) y por sustancias húmicas (compuestos de estructura no especifica). Su color es oscuro.

La Tabla 5.24 establece clases texturales, como combinación de la fracción mineral en porcentajes de arcilla, limo y arena. Estos términos específicos proporcionan una idea de síntesis y facilitan la utilización de la información. Para establecer dichas clases, se ha buscado agrupar aquellos suelos con análogo comportamiento frente al agua y la respuesta de las plantas.

Tabla 5.24. Valores límite para fracciones granulométricas USDA y ISSS

Denominación de granulometría	Fracción	Diámetros aparentes en mm
USDA	Arena gruesa	500 < Φ < 2000
	Arena fina	2 < Φ < 500
	Limo	2 < Φ < 50
	Arcilla	F Φ 2
ISSS	Arena gruesa	200 < Φ < 2000
	Arena fina	20 < Φ < 200
	Limo	2 < Φ < 20
	Arcilla	Φ < 2

Siguiendo con consideraciones de índole edafológico: El comportamiento de un suelo será la respuesta a la acción combinada de las distintas fracciones, que interaccionan entre ellas y con la materia orgánica. A pesar de ello, en suelos con texturas desequilibradas y pobres en materia orgánica, el predominio de una de las fracciones puede resultar determinante. La acción de las distintas fracciones, caso de predominar una de ellas, puede tener la siguiente significación:

Elementos gruesos:

- Disminuyen la cohesión en horizontes muy arcillosos, lo que favorece la penetración de las raíces en la interfase elemento grueso-matriz.

- Aumentan la permeabilidad si se hallan en proporción suficiente.
- Si son porosos retienen humedad.
- Frenan la erosión y las pérdidas de agua si recubren el suelo.
- Liberación potencial de nutrientes al meteorizarse.

Suelos pedregosos:

- Dificultan el movimiento de la fauna en el suelo.
- Menor almacenamiento de agua.
- Menor cantidad de nutrientes asimilables.

Arena gruesa:

- Macroporosidad alta.
- Permeabilidad alta.
- Compacidad baja.
- Energía de retención de humedad baja.
- Almacenamiento de nutrientes bajo.
- Capacidad de retención de agua disponible para las plantas baja.

Arena fina:

- Propiedades intermedias entre arena gruesa y limo.
- Minerales poco meteorizables.
- Riesgo de erosión eólica elevado.

Limo (franco-limoso):

- Fertilidad física deficiente.
- Riesgo de encostramiento superficial.
- Velocidad de infiltración baja.
- Compacidad media.
- Erosionabilidad alta.
- Almacenamiento de nutrientes medio.
- Capacidad de retención de agua disponible para las plantas media a baja.

Arcilla:

- Fertilidad química alta, según mineralogía.
- Superficie específica muy alta.
- Capacidad de intercambio catiónico alta, dependiendo de la mineralogía de las arcillas.
- Alta capacidad de retención de agua disponible para las plantas.
- Permeabilidad baja, dependiendo de que se puedan formar pseudolimos o pseudoarenas.
- Microporosidad alta.
- Energía de retención de humedad alta.
- Dificultad de penetración de las raíces.

Salta a la vista que encontrar un suelo que reúna unas ciertas condiciones para el cultivo es cada día más complicado, en especial en las áreas densamente pobladas, de ahí el interés en desarrollar soportes artificiales fabricados con residuos. Los cultivos «sin suelo», se suelen clasificar en dos grandes grupos:

- Cultivo hidropónico, es decir cultivo en agua que contiene nutrientes y materiales inertes.
- Cultivo en sustratos, o sea, material sólido químicamente activo.

3.1. SOPORTES AGRÍCOLAS A PARTIR DE RESIDUOS

También se pueden crear soportes artificiales a partir de arcilla y residuos de naturaleza orgánica, de ahí la inclusión en esta obra. Los soportes artificiales tienen la ventaja de que se pueden diseñar a conveniencia en función de cada aplicación concreta. Para la obtención de soportes a partir de residuos se deberá fabricar un material cerámico de pequeño tamaño de manera que presente mucha superficie con relación al peso. En estas condiciones si el residuo añadido tiene una fibra razonablemente larga, se conseguirá una porosidad abierta apta para la retención de agua.

La explosión demográfica y el agotamiento de las zonas fértiles están provocando un cambio paulatino en la agricultura. A medida que pase el tiempo será más difícil cultivar sobre soportes naturales que tengan unas propiedades adecuadas para el cultivo, unos por su impermeabilidad (la arcilla) y otros por su nula retención de agua (suelos arenosos), de ahí que se desarrollen los sustratos artificiales. Para ello se han desarrollado las técnicas CSS (Cultivos Sin Suelo).

La misión principal de un sustrato consiste en retener y dosificar el agua precisa, así como los nutrientes necesarios para el desarrollo vegetal. La estructura de un sustrato debe ser extraordinariamente porosa puesto que en sus cavidades capilares se almacena el agua y los nutrientes que serán succionados por la raíz de la planta.

Una ventaja adicional de esta aplicación es que el líquido que impregna el sustrato, sí se quiere potenciar la agricultura ecológica pueden ser aguas residuales, deyecciones de animales, etc., a los que se han añadido las cantidades convenientes de N, P y K. O bien agua corriente a la que se añaden compuestos fertilizantes artificiales.

Una vez fabricado el sustrato se sumerge en un baño de agua residual, a la que también se deben aña-

dir otros nutrientes en el caso de que el líquido de partida no los contenga todos o estén de forma descompensada. Este modo de proceder explica el porqué no contaminan los sustratos impregnados con aguas residuales. Por el contrario, cuando se esparce un residuo líquido (por ejemplo un purín) en el campo los microorganismos patógenos entran en contacto con las plantas (tallo y hojas) de manera directa. Mientras que si el mismo residuo líquido permanece en el interior del capilar, la raíz y la propia planta los transforman y absorbe lo que le conviene. La aspersión de purines en el suelo agrícola tiene la misión principal de crear un medio adecuado para que se instalen los microorganismos que serán los encargados de transformar el nitrógeno a formas nitrogenadas asequibles a las plantas, además de remover el terreno y facilitar la aireación.

Una vez el sustrato está impregnado, se aplica directamente sobre la tierra de cultivo (también puede hacerse sobre una superficie impermeable, como el hormigón) y se añaden las semillas. El tiempo de funcionamiento dependerá de la naturaleza del cultivo y de la frecuencia de siembra. No obstante, como que contiene una proporción de nutrientes infinitamente superior que una tierra natural, su vida útil es muy superior.

La frecuencia de riego depende del tipo de cultivo. Hay que pensar que, además de los macro nutrientes (N, P y K) y de los micronutrientes, básicamente las materias primas de la biomasa son el agua (H_2O) y el dióxido de carbono (CO_2). Éste último está en el aire pero el agua debe añadirse cuando se requiera. La cantidad de agua depende de muchos factores: del clima, del tipo de suelo (textura, color, composición, etc.), del cultivo (superficie de las hojas), etc. Se puede distinguir entre:

- *Evaporación del suelo*. Un suelo desnudo de vegetación y sin cubierta, sobre todo si no tiene sombreo, evapora el agua directamente a la atmósfera.
- *Evapotranspiración*. Es el agua perdida por la evaporación directa del suelo y por la transpiración de las plantas a través de su superficie foliar y es la que se debe reponer con el riego.

Con el tiempo deberá añadirse al campo más sustrato impregnado. Con los años, cuando el ritmo de crecimiento se torne manifiestamente más débil, se aconseja extraer el sustrato y volver a impregnarlo. La vida del soporte cerámico es infinita. Un sustrato estrictamente residual y sin apenas manipulación es la corteza de coco triturada y seca.

3.2. SOPORTE CERÁMICO FABRICADO CON RESIDUOS

El soporte fotografiado, que aparece en la Figura 5.49, es un material cerámico fabricado a partir de lodos procedentes del lavado de áridos y gravas y de fangos de depuración de aguas residuales urbanas, que goza de unas características fisicoquímicas tales que permite su reutilización para fines agrícolas y la revegetación de zonas degradadas por actividades extractivas, dada su capacidad de retención-liberación de agua y de elementos nutrientes.

Tanto los lodos de plantas de fabricación de áridos como los fangos procedentes de la depuradoras tienen escasas salidas. Ambos residuos debidamente integrados en una matriz cerámica forman un sustrato que aúna dos características principales: transforma los residuos en un material útil y contribuye a la mejora del medio ambiente, tanto por activa (eliminación directa de residuos), como por pasiva (uso de estos residuos transformados en la restauración de zonas degradadas), o bien su empleo directo en el campo.

3.2.1. Fabricación del soporte cerámico

Las materias primas (residuos) descritas, mezcladas con unas arcillas de interés cerámico comunes seleccionadas, se tratan de manera similar a lo que se lleva a cabo en una industria cerámica de material estructural. Esto es: se trituran, se conforman para darles la forma y geometría deseada, se secan y finalmente se cuecen a una temperatura superior a 1.000 ºC.

El proceso, desde el punto de vista de fabricación, es más sencillo en cuanto a maquinaria e inversión que el que corresponde a una industria ladrillera ya que el material a obtener, el sustrato, se expende en granos.

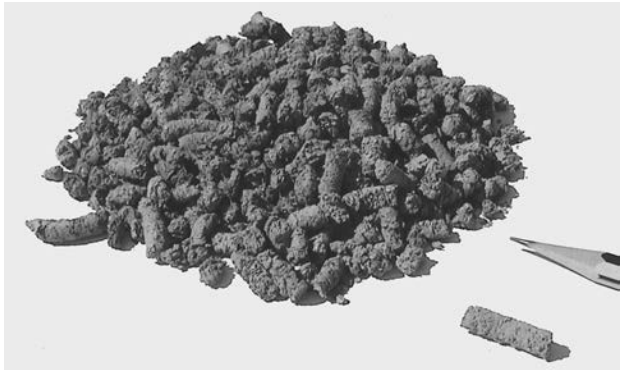


Figura 5.49. Soporte agrícola de cerámica fabricado con residuos.

3.2.2. Características del producto fabricado

Así pues, se obtiene un material, soporte o gránulo, que tiene las siguientes características:

- *Baja densidad:* del orden de 500 kg/m^3, o sea una densidad, muy inferior a las cerámicas convencionales y perfectamente comparable, en cuanto a densidad, a los materiales porosos naturales.
- *Alta porosidad abierta:* del orden del 100% de retención de agua en peso. En realidad esta propiedad se puede modificar o alterar a voluntad, según sea la formulación de la mezcla de partida, a base de provocar una red microcapilar diferente.
- *Liberación de nutrientes:* Una vez confeccionado el sustrato se sumerge en un líquido que contiene una gran cantidad de nutrientes (por ejemplo aguas residuales).
- *Gran capacidad de retenciòn/liberaciòn hídrica*, lo que permite, una vez en servicio, liberar de manera fácil los nutrientes (N,P,K) que, una vez fabricado el sustrato se le hayan incorporado, hacia los vegetales.

3.2.3. Ventajas medioambientales

Desde el punto de vista de las materias primas el hecho de utilizar residuos en la fabricación del sustrato supone un gran favor al medio ambiente, ya que retira del medio todos estos residuos que son contaminantes y que, por su cantidad y toxicidad, suponen un gran impacto ambiental.

Además, hay que valorar el factor de que al utilizar materias primas ya existentes (los residuos), no es preciso extraer nuevos materiales vírgenes con el consiguiente ahorro de energía y de materias primas.

El tratamiento conjunto de los residuos generados en un sistema de producción común, de naturaleza y propiedades muy diversas, se considera *a priori* como la mejor alternativa para su incorporación medioambiental minimizando las consecuencias negativas, porque las características o composición de uno de los residuos, pueden atenuar o mejorar las del otro durante el tratamiento térmico. Así puede citarse que la presencia de partículas coloidales en los lodos, favorecerá la formación de microporos durante el proceso de ceramización. Los elementos potencialmente tóxicos, básicamente los metales pesados, dejarán de ser un problema medioambiental al quedar atrapados en la matriz vítrea del producto final, por ello se podría pensar también en incluir otros residuos tóxicos para inertizarlos en esa matriz.

Este producto es útil para el recubrimiento y restauración de antiguas canteras procedentes de la explotación de diversos minerales. Con ello se quiere indicar finalmente que mediante la utilización del proceso de tratamiento térmico de los residuos provenientes de varios sectores se pueden restaurar espacios afectados por actividades del mismo sector de producción.

Hay que tener presente, cuando el soporte está bien fabricado (material cerámico correcto), que el líquido alojado en sus poros no se va a incorporar los elementos de que se compone la cerámica. En otras palabras, el soporte es completamente inerte, es decir, el líquido no va a hacer lixiviar ningún elemento del material cerámico (inerte) o sea: todos los nutrientes serán aportados por el líquido.

3.2.4. Campos de aplicación

Al margen de los mencionados anteriormente, el sustrato tiene un empleo masivo en los campos de cultivo mezclado con la tierra, ya que a su capacidad de retención y acumulación de agua se suma su poder de dosificación de nutrientes.

Así pues, las aplicaciones típicas son:

- Cultivos hidropónicos, invernaderos, cultivo de flores,..
- Zonas áridas donde el agua sea escasa.
- Restauración de paisajes y áreas degradadas.
- Revegetación de taludes y zonas de grandes pendientes.
- Controlador para la dosificación de insecticidas, herbicidas, ...

En el punto 19 del DVD adjunto se muestran ejemplos de sistemas de revegetación de taludes.

3.2.5. Aspectos económicos

El hecho de utilizar residuos industriales como materias primas, además de las ventajas medioambientales que reporta en cuanto a inertización y reciclaje, supone una economía muy grande en concepto de adquisición de materias primas en el proceso productivo.

Por otra parte, el sustrato se fabrica de modo similar a como se hace en una cerámica de construcción convencional, lo que permite utilizar, con ligeras reformas, instalaciones fabriles destinadas a la

producción de material convencional (ladrillerías). De esta manera la inversión a realizar es menor.

Valorando todos estos aspectos, en especial el coste negativo de las materias primas (los residuos se pagan), en líneas generales se puede afirmar que el coste de fabricación del sustrato es inferior al de un material cerámico convencional.

En el punto 20 del DVD adjunto se muestran diversos ejemplos de cultivos experimentales realizados en Méjico, bajo la dirección de este autor, en Química Wimer.

3.3. RESIDUOS ÚTILES COMO FERTILIZANTES

Una vez fabricado el soporte, con residuos y gracias a la tecnología cerámica, es preciso impregnar el soporte para que haga las veces de fertilizantes y ello también puede lograrse con diversos residuos, los denominados elementos nutrientes también forman parte de residuos, esencialmente, de naturaleza inorgánica.

3.3.1. Los macroelementos

Son los que las plantas precisan en mayores cantidades que, a su vez se pueden dividir en elementos primarios (N, P y K) y secundarios (Ca, Mg y S). En términos generales, la función que cada de ellos realiza en la planta es:

- *Nitrógeno.* Su función principal es el desarrollo de tallos y hojas. Su origen puede proceder de la disolución de las numerosas sales presentes en el suelo. Su carencia provoca el amarillamiento de las hojas (clorosis) y el poco desarrollo de las raíces en profundidad con lo que la planta es más susceptible a sufrir situaciones de sequía y su exceso un crecimiento desmesurado y oscurecimiento.
- *Fósforo.* Su función principal es el desarrollo de las raíces y el crecimiento inicial de las plantas, mejora la resistencia a las plagas y a las enfermedades. Se necesitan cantidades bastante menores que de nitrógeno. Es un elemento poco soluble en agua. Su carencia se evidencia por un crecimiento lento y manchas rojizas en las hojas.
- *Potasio.* Estimula el crecimiento de las raíces y aumenta la resistencia a las enfermedades. Favorece la acumulación de sustancias de reserva y, en períodos de calor y ausencia de agua, reduce la tendencia al marchitamiento. Las necesidades de este elemento son similares a las de nitrógeno. La carencia provoca flores y frutos pequeños, necrosis en las puntas de las hojas y crecimiento lento. El exceso provoca desequilibrio con otros elementos.
- *Calcio.* Es indispensable para la formación de nuevas células y se precisa en cantidades apreciables. La carencia provoca la muerte de brotes terminales, el crecimiento de las raíces y la caída prematura de brotes y flores. El exceso conduce a clorosis de las hojas por limitar la absorción de hierro.
- *Magnesio.* Es esencial para la fotosíntesis. Su carencia produce amarillamiento, curvatura del borde de las hojas hacia arriba y necrosis.
- *Azufre.* Interviene en la formación de la clorofila y si los suelos tienen suficiente materia orgánica no suele faltar. Su deficiencia produce plantas pequeñas y alargadas, crecimiento lento y atraso en la madurez.

3.3.2. Los microelementos u oligoelementos

Por lo general se aportan en forma de quelatos (estructuras aromáticas unidas por un puente de hidrógeno, muy estables) para evitar las carencias producidas por el pH del suelo o por la competencia en la absorción con otros nutrientes. Los más importantes son:

- *Hierro.* Activa los procesos de respiración, fotosíntesis y fijación simbiótica del nitrógeno en el suelo. Su carencia provoca la muerte de ramillas. En suelos de pH básico se dificulta su absorción por la planta, por lo que conviene aportarlo en forma de quelatos.
- *Zinc.* Es un importante regulador del crecimiento. Su deficiencia es habitual en suelos calcáreos y en aquellos que contienen exceso de fósforo. Los tallos cortos y la reducción de las yemas frutales denotan su carencia.
- *Cobre.* Es un activador de varias enzimas de las plantas. Su deficiencia se produce en suelos orgánicos y arenosos. Los síntomas de su carencia son hojas de moteado amarillo y limitación del crecimiento, marchitez y necrosis en la punta de las hojas.
- *Manganeso.* Refuerza la acción del hierro en la clorofila y actúa como activador de las enzimas del crecimiento. Su deficiencia se produce en suelos básicos y los síntomas son clorosis. Puede llegar a provocar la caída de hojas.

- *Boro.* Es importante para el crecimiento de los tejidos. Su deficiencia se da mas en suelos básicos. Su carencia provoca hojas engrosadas, dobladas, cloróticas y marchitas, reducción de la polinización y de la floración.
- *Molibdeno.* Es necesario para la utilización del nitrógeno por parte de las plantas.

Con las debidas precauciones, los residuos pueden aportar una serie de correctores de los elementos citados, como:

- Nitrógeno, a partir de sangre seca en polvo: La mezcla de harina de sangre, pescado y huesos tiene la siguiente composición: N: 3,5%, P: 8,0%, K: 0,5%.
- Fósforo, a partir de hueso en polvo (N: 3,5%, P: 22,0%).
- Calcio y potasio, de origen mineral.
- Magnesio y hierro, harina o solución de algas marinas (N: 2,8%, P: 0,2%, K: 2,3%, microelementos: todos), o estiércol líquido (N: 1,0%, P: 1,0%, K: 1,5%, microelementos: todos).
- Azufre, a partir de yeso en capa muy suave.
- Zinc, cobre, boro, manganeso y molibdeno, a partir de harina de algas marinas o estiércol.

4. Aislantes fabricados a partir de residuos

El sonido se define como cualquier variación de la presión del aire que puede ser detectada por el oído humano. Con independencia de la fuente de generación, el ruido se transmite por medio de una onda longitudinal, de naturaleza senoidal, que cuando llega al oído se percibe como una sensación de sonido o denominado ruido si es muy fuerte. Estas ondas, cuando están comprendidas en el intervalo de frecuencias de 20 hasta 20.000 Herzios (vibraciones por segundo, o ciclos por segundos), se denominan vulgarmente ondas sonoras. La recepción de la onda sonora por el oído engendra una vibración de las partículas de aire situadas delante del tímpano, con una frecuencia definida y una amplitud determinada. Las medidas efectuadas indican que las máximas variaciones de presión de los sonidos que el oído puede tolerar son del orden de 280 dinas/cm^2 (por encima o por debajo de la presión atmosférica).

La intensidad de una onda (E) que se propaga se define como la cantidad de energía transportada por la onda por unidad de superficie y de tiempo, por tanto se medirá en w/cm^2. A causa del gran intervalo de intensidades a los cuales es sensible el oído, es mas recomendable emplear una escala logarítmica para su medición, en lugar de la escala natural. De esta manera se surge el decibelio (dB), o nivel de intensidad que se define como: $dB = 10 \log (E/E_0)$. Donde E es la intensidad de la onda y E_0 la intensidad de referencia.

La presión sonora se define como el incremento de la presión atmosférica que resulta de la presencia o falta de sonido. La magnitud que normalmente se mide, con un micrófono, es la presión sonora eficaz. La potencia sonora equivale a la emisión sonora de una fuente de ruido y se expresa en w. La relación entre estos parámetros y la fuente originaria o habitual se halla sintetizado en la Tabla 5.25.

El ruido afecta de manera muy importante a las personas, por ello las autoridades ambientales y sanitarias establecen unos límites de emisión de ruidos o bien medios para su corrección como pantallas o medios mitigadores de la propagación. Es en este apartado donde los residuos hallan una oportunidad para su empleo a base de la construcción de elementos aislantes y absorbentes acústicos.

La Tabla 5.26 muestra un abanico de posibilidades de fabricar diversos materiales aislantes. Ello no significa que dichos materiales deban ser fabricados exclusivamente con residuos. La razón de que aparezcan en la tabla responde al hecho de que muchos de estos materiales han sido fabricados sólo con residuos.

Así los integrantes de la lana mineral, básicamente basalto, pueden ser sustituidos por otros minerales procedentes de escombreras. Como se vera ampliamente en el capítulo destinado a la vitrificación, la fusión es una tecnología muy apropiada para la valorización de un sin fin de residuos inorgánicos.

Con las escorias metalúrgicas se han fabricado, y se fabrican, los mismos productos que con los materiales vírgenes que se utilizan para la fabricación de la lana de vidrio.

Con la fibra de madera (residuo de la silvicultura) se fabrican un sinfín de materiales, comenzando por

Tabla 5.25. Relación entra la presión, la intensidad sonora y su fuente (Fuente Acústica Integral)

Presión (Pa)	Intensidad (w/m²)	L (dB)	Fuente
63,2	10	130	Umbral de dolor
20,0	1	120	Despegue de un reactor.
6,32	0,1	110	Máquina de obra pública.
2,0	0,01	100	Martillo neumático.
0,632	0,001	90	Camión diesel a 11 metros.
0,2	0,0001	80	Grito a 1 metro.
0,0632	0,00001	70	Oficina llena.
0,02	0,k000001	60	Conversación normal a 1 metro.
0,00632	0,0000001	50	Área urbana tranquila durante el día.
0,002	0,00000001	40	Área urbana tranquila noche.
0,000632	0,000000001	30	Área suburbana tranquila noche.
0,0002	0,0000000001	20	Campo tranquilo.
0,0000632	0,000000000001	10	Rumores.
0,00002	0,0000000000001	0	Umbral de audición.

Tabla 5.26. Valorización de diversas fibras

TIPOS	A	B	C	D	E	F	G
Lanas minerales o de vidrio	X	X	X	X	X	X	X
Escorias metalúrgicas	X	X	X	X	X	X	X
Fibras de madera			X		X		
Fibras de madera tratada						X	
Derivados de algodón			X		X		
Áridos expandidos						X	X

A: Fibras sueltas o a granel; B: Fibras conformadas: mantas, paneles, papel; C: Papel; D: Láminas superficiales; E: Láminas exfoliadas; F: Granos expandidos; G: Granos porosos.

el propio papel, pasando por diversos tipos de paneles o los productos que indica la tabla. La Figura 5.50 muestra un ejemplo de ello.

El ejemplo reproducido en la figura corresponde a un panel de la marca comercial (ACUFELT 145) que esta compuesto por fibras minerales y naturales troceadas y aglomeradas. Tiene una densidad de 45 kg/m^3 y unas excelentes propiedades de absorción acústica.

En el punto 21 del DVD adjunto se muestran diversos ejemplos de elementos constructivos realizados a base de aserrín aglomerados con resinas poliméricas para mejorar sus prestaciones técnicas y su aspecto estético.

4.1. NOCIÓN DE AISLAMIENTO ACÚSTICO Y ABSORCIÓN ACÚSTICA

La onda sonora se propaga a través del aire. Si encuentra una superficie lisa, o reflectante, se reflejará

Figura 5.50. Paneles de fibra mineral y vegetal.

casi como con la misma intensidad con la que incidió. En este caso se dice que el medio es reflectante (caso de los recintos revestidos con vidrio, superficies metálicas o cerámicas. La onda sonora empieza a rebotar de una pared a otra: reverbera y es imposible lograr una nitidez del sonido). Por el contrario si la perturbación incide contra una superficie porosa una parte de la perturbación penetra y la energía es absorbida por el medio (llevando al extremo esta propiedad, la antítesis de la reverberación, solo sería posible captar el sonido antes de que la onda incidiera en la pared). Finalmente, si el foco de ruido se halla separado del receptor por una gran masa de materia no se percibirá nada, sería el caso de un aislamiento acústico (como el que acontece con los grandes muros de piedra).

La onda sonora cuando incide en una pared una parte se refleja, otra se absorbe y otra traspasa, tal como indica la Figura 5.51.

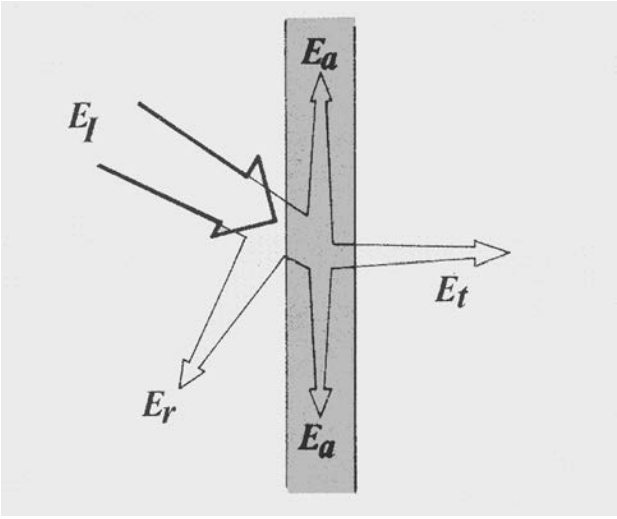


Figura 5.51. Sonido: reflexión, absorción y traspaso.

Así pues, se debe distinguir entre:

- Absorción acústica: Se llama así a la relación existente entre la energía sonora incidente E_i y la energía absorbida E_a. El coeficiente de absorción, que depende de la naturaleza de cada material, varía con la frecuencia del sonido incidente.
- Reflexión acústica: Es la relación existente entre la energía de la onda incidente E_i y la energía reflejada E_r.
- Aislamiento acústico: de una pared indica la reducción sonora en decibelios (dB) producida por la interposición de la misma entre dos medios, siendo uno la fuente sonora y el otro el local receptor. El aislamiento acústico R se expresa por:

$$R = 10 \log \frac{E}{E_a}$$

4.2. RESIDUOS EMPLEADOS EN LA FABRICACIÓN DEL SILICATO CÁLCICO

El silicato cálcico es uno de los mejores aislantes que existen. En nuestras latitudes se usa preferentemente para aislamientos de cierta temperatura (hay calidades que pueden soportar 1.000 ℃ en cara caliente) pero en otros países, por ejemplo los Países Bajos, el 60% del aislamiento de las viviendas se lleva a cabo con este tipo de material. Tanto es así que se fabrican más de 3,5 millones de toneladas anuales en diversos formatos que van desde paneles a ladrillos pasando por bloques.

El silicato cálcico se produce a partir de arena (SiO_2) y carbonato de cal (CO_3Ca). Se ha fabricado una modalidad a base de añadir cenizas volantes procedentes de las centrales termoeléctricas. Sin embargo el carbono residual que contienen las cenizas provoca un cambio de color (el silicato cálcico es blanco). Una fuente de residuo que no altera el color es el fango de papelera calcinado. Las papeleras que trabajan con papel recuperado generan gran cantidad de rechazo que contienen tintas, fibras celulósicas y materiales de relleno. Son precisamente estos «*fillers*» los que interesan para la aplicación puesto que están compuestos de caolín, carbonato cálcico, alúmina, etc., minerales todos ellos compatibles con el silicato cálcico.

4.3. VALORIZACIÓN DE RESIDUOS DE YESO

El yeso, sulfato cálcico, es obviamente un producto inerte. Sin embargo aparece como subproducto de muchos procesos industriales contaminado con diferentes sustancias y es preciso explorar nuevas vías para la valorización de los mismos.

4.3.1. Valorización del yeso procedente de neutralización (FGD)

Los combustibles que contienen azufre, básicamente los carbones y el coque de petróleo, producen SO_2 durante la combustión que es preciso neutralizar antes de emitirlo a la atmósfera. Ello se lleva a cabo por la adición de óxido o lechada de cal que reaccio-

na con el anhídrido sulfuroso/sulfúrico formando yeso, de acuerdo con la reacción:

$$SO_3 + Ca(OH)_2 \rightarrow SO_4Ca + H_2O$$

El yeso hidratado que procede de las instalaciones de desulfuración es hidratado $SO_4Ca\text{-}2H_2O$ y se puede usar perfectamente en la composición de los morteros que se aplican inmediatamente sobre el forjado de los pisos. Las baldosas, parquets o cualquier otro acabado se instalan sobre esta capa de mortero. Sin embargo esta aplicación no es capaz de absorber las enormes cantidades de yeso de desulfuración. A medio plazo todo apunta a que la solución pasa por la conversión en anhidrita. Para ello los sistemas desarrollados son:

- *Térmicos*: donde el dihidrato ($SO_4Ca \cdot 2H_2O$) se convierte en b-hemidrato y más tarde en anhidrita cuando está inmerso en la corriente de aire caliente.
- *Hidrotérmico*: donde el dihidrato ($SO_4Ca \cdot 2H_2O$) se transforma, en un autoclave, en a-hemidrato y más tarde, en un proceso térmico similar al anterior en anhidrita. Ésta, una vez fría es ya útil para la venta.

Existen ya instalaciones industriales que valorizan este yeso. En el caso de España, país donde el yeso natural es muy abundante, las posibilidades de reciclaje son escasas.

Para dar mayor valor añadido a este material y, de pasada, elaborar un material aislante más sofisticado se fabrica el yeso (escayola) aligerado. Ello se puede conseguir aumentando la relación agua/escayola, realización de la escayola mediante agua carbonatada, adición de aireantes a la mezcla o incorporación de espumantes a la mezcla.

4.3.2. Materiales estructurales con yeso FGD

Existen dos maneras de valorizar el yeso procedente de la desulfuración: en materiales de construcción o para la adición al clínquer para la producción de cemento.

La mayor parte del yeso FGD (*Filter Gypsum Desulphuration*) corresponde a $\alpha\text{-}SO_4Ca \cdot 0{,}5 \cdot H_2O$. La Tabla 5.27 muestra las diferencias, en porcentajes de peso, entre el yeso FGD y el yeso natural.

Como indica la tabla precedente no existe gran diferencia entre uno y otro. La operación que debe realizarse consiste en la deshidratación a base de calentarlo a 130 ℃ durante seis horas. A partir de aquí adquiere unas características homologables con cualquier yeso, por lo que hace referencia a los parámetros de fraguado.

Tabla 5.27. Composición química de yesos

Componente	Yeso FGD	Yeso natural
CaO	32,55	32,22
SO_3	46,06	46,05
H_2O ligada	19,26	19,83
SiO_2	0,8	0,78
MgO	0,40	0,35
Fe_2O_3	0,07	0,05
Al_2O_3	0,28	0,43
TOTAL	99,71	99,42

La otra aplicación, la adición al clínquer, el yeso FGD debe secarse a 45 ℃. Las características que se obtienen son, prácticamente idénticas a las conseguidas con anhidrita. A veces, según el tipo de clínquer se observan algunas diferencias que, básicamente son debidas a la falta de conocimiento de la interacción entre el yeso y los componentes del clínquer.

4.3.3. Bloques de yeso y cenizas volantes para biotopos

En la mayoría de las plantas el yeso de desulfuración es un compuesto cristalino granular, cuya dimensión es, normalmente, menor de 200 μm. Su pureza suele ser mayor que la mayoría de los yesos naturales.

En EE UU y Japón se ha ensayado la fabricación de bloques a base de yeso de desulfuración, cenizas volantes y cemento portland para construir arrecifes artificiales. Con ello se crea un biotopo muy apto para el desarrollo de la flora y la fauna marina. A la vez estas edificaciones submarinas protegen a la costa de los fuertes temporales.

La resistencia mecánica de los bloques es directamente proporcional a la relación portland/yeso, aunque hay que tener presente que no siempre se precisa una elevada resistencia mecánica. Además en este tipo de material, como en casi todos los que incorporan cenizas volantes, la resistencia mecánica aumenta con la edad. Otra característica interesante de esta mezcla es que la resistencia es mayor en agua marina y esta propiedad se puede potenciar si el fraguado se lleva a cabo en un autoclave.

Una vez comprobado que los lixiviados de esta mezcla son compatibles con el biotopo marino, se ha desarrollado este material para la construcción de arrecifes artificiales submarinos. De hecho el hipotético peligro de lixiviación proviene de las cenizas volantes, puesto que el yeso suele ser puro. La capacidad de lixiviación de las cenizas volantes es muy baja habida

cuenta de su carácter eminentemente vítreo. El proceso de fabricación de este producto es como sigue:

- Mezclar ceniza volante y yeso en proporciones de 1/3 hasta 1/5 en porcentajes sobre peso en seco.
- A la mezcla se le añade un 6% de hidróxido cálcico y un 4% de cemento portland.
- Una vez conformado el bloque, normalmente prensado en seco, se seca en una cámara de secado a 70 ℃ durante 2 días.

4.3.4. Ecogyps: panel absorbente acústico a partir de residuos

El fosfoyeso es un residuo abundantísimo que procede de las plantas de fertilizantes. Su origen radica en el tratamiento de los fosfatos naturales con ácido sulfúrico. Es un residuo tóxico y peligroso con pocas vías de valorización.

Para conseguir un producto absorbente de la onda sonora se precisa un material dotado de una gran porosidad abierta. Además la porosidad debe atravesar el panel en forma laberíntica de esta manera la perturbación es, prácticamente, absorbida y no se transmite casi nada.

El Ecogyps esta fabricado a partir de fosfoyeso, residuo muy abundante en la industria de fertilizantes, arenas de fundición y, en menor escala, otros residuos. El conjunto se moldea en frío, por extrusión, se seca y finalmente se ceramiza a una temperatura próxima a los 1.200 ℃.

El material así fabricado es un excelente absorbente acústico para aplicaciones al exterior que tiene la particularidad de resistir cualquier inclemencia atmosférica. Ello lo sitúa con ventaja frente a las lanas de roca o de vidrio ya que estas no resisten la acción directa de la lluvia. Además su solidez permite ser trabajado como un bloque cerámico ligero, o sea como si tratara de un material estructural de cerramiento.

4.4. VALORIZACIÓN DE OTROS RESIDUOS

Con independencia de los ya mencionados, y si ánimo de ser exhaustivos, se pueden citar:

- Caucho recuperado a partir de neumáticos fuera de uso, cintas transportadoras trituradas, residuos de esta naturaleza, etc.
- Gomas en general.
- Fibras de materiales plásticos (por ejemplo, fibras de poliéster ya citadas en este capítulo, polietilenteraftalado, polibutilenteraftalado, espumas, etc.).
- Madera triturada, ya sea de fibra natural o aglomerada.
- Todo tipo de textiles.

Como es lógico, cada uno de estos materiales aporta una característica diferente:

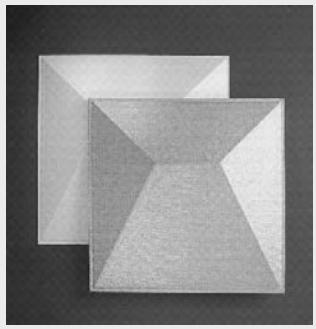


Figura 5.52. Panel de fibra de poliéster reciclada (Cortesía de Zicla).

Las fibras de *materiales plásticos*, son resistentes al polvo, con el tiempo no pierden peso y no se deterioran, por lo que funcionan bien para el forrado interno de los conductos de climatización. Para el tratamiento de absorción acústico de salas de máquinas, paredes y techos en general. Paneles decorativos absorbentes y difusores acústicos. La Figura 5.52 muestra un panel decorativo elaborado completamente con fibra de poliéster reciclada.

Los *materiales textiles* se emplean para la elaboración de fieltros ya que la textura textil proporciona una gran porosidad interna que le confiere un gran poder absorbente y antivibratorio. La Figura 5.53 muestra unas placas, con relieve antisonoro, fabricada a partir de fibras textiles recuperadas.

Figura 5.53. Placas de fibras textiles recicladas (Cortesía de Zicla).

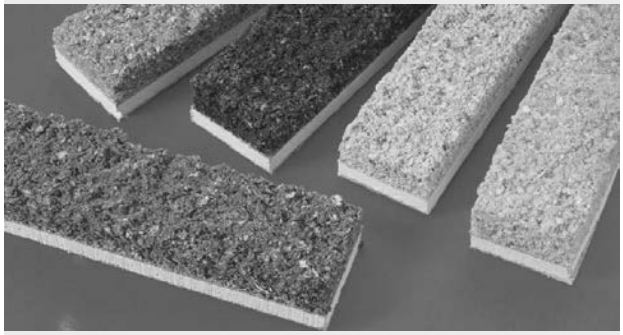


Figura 5.54. Placas absorbentes elaboradas con papel de periódico (Cortesía de Zicla).

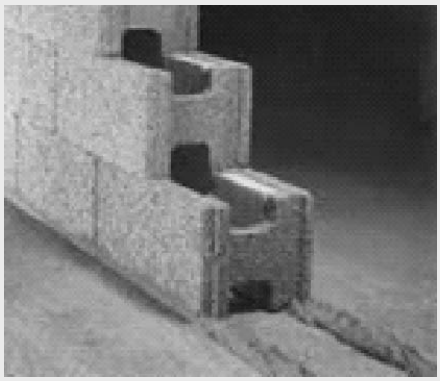


Figura 5.55. Bloques de aserrín con propiedades acústicas (Cortesía de Zicla).

El *papel triturado* y proyectado es ideal para el tratamiento de espacios con limitaciones físicas y/o estéticas. También se puede emplear en la fabricación de elementos aglomerados como placas y plafones. La Figura 5.54 muestra una foto de paneles elaborados exclusivamente con papeles de periódico. Se uasa para el tratamiento acústico de recintos como salas de música, discotecas, polideportivos, salas de maquinas, etc.

La madera recuperada. La Figura 5.55 muestra un bloque prefabricado a partir de desechos de madera (aserrín procedente de la trituración de palets) con propiedades de aislamiento acústico.

Los *materiales a base de caucho* están especialmente indicados para la fabricación de elementos amortiguadores de las vibraciones. La Figura 5.56 muestra unos paneles fono absorbentes a base de caucho reciclado, lana de roca, fieltro y aglomerante.

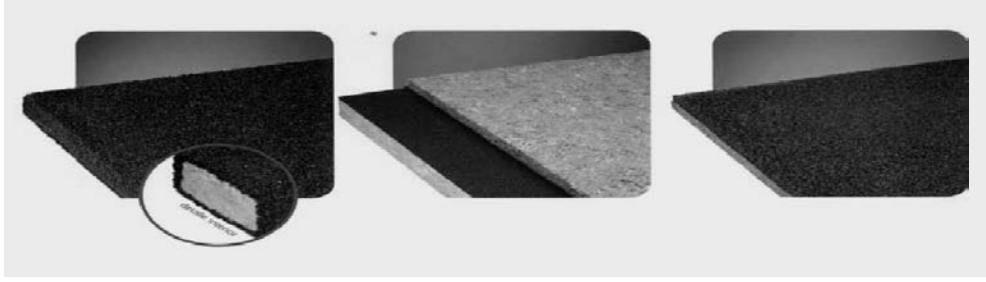


Figura 5.56. Panel fono absorbente a base de caucho (Cortesía de Zicla).

5. Pantallas acústicas

Las pantallas acústicas son protecciones para atenuar el ruido provocado, básicamente, por el tráfico ya sea de vehículos o de ferrocarril. Existen dos modalidades de barreras acústicas:

- *Las barreras reflectantes*, fabricadas con materiales con escasa o nula porosidad como la cerámica densa o el vidrio. Obviamente, solo protege del ruido la parte situada detrás de la barrera.
- *Las barreras absorbentes*, fabricadas con materiales con mucha porosidad abierta. Como absorbe la onda sonora, protege ambas partes.

A la lista también se podría añadir las densas, un talud de tierra o un muro de piedra, son barreras a la propagación del sonido. Sin embargo, tratándose de protecciones al tráfico debe tenerse siempre presente la seguridad. El impacto contra un muro de estas características suele ser muy grave.

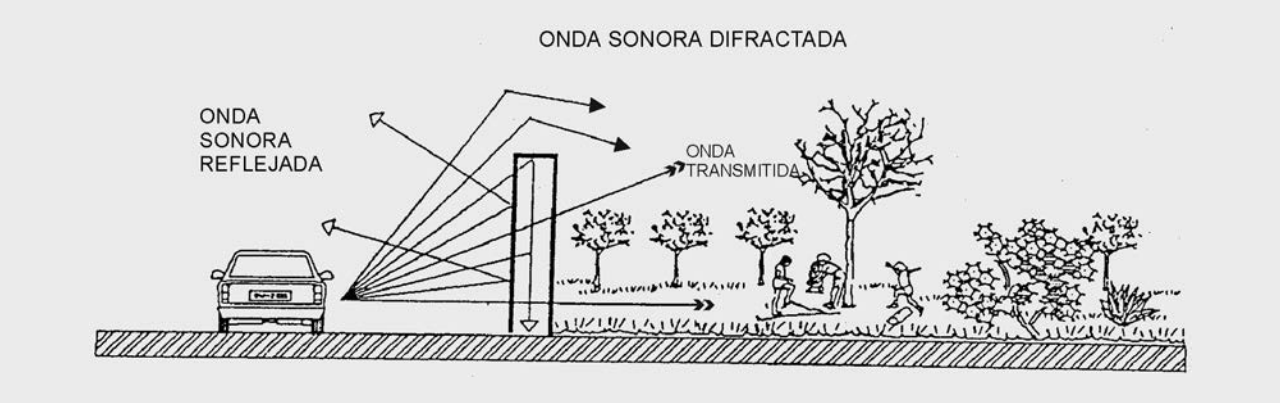


Figura 5.57. Principio de funcionamiento de una pantalla acústica.

Los desarrollados sistemas de transporte actuales generan un tremendo impacto ambiental uno de cuyos componentes más importantes es el ruido. En las grandes aglomeraciones el factor acústico derivado de los diversos sistemas de transporte el problema se hace todavía más agobiante. Estudios realizados en diversos países demuestran que casi el 80% de las quejas de los habitantes de las grandes ciudades están motivadas por el ruido procedente de los medios de transporte.

A pesar de que los fabricantes de vehículos han desarrollado dispositivos que atenúan el nivel sonoro y los firmes se construyen de manera que la absorción de ruido sea mayor, el incremento del tráfico, la proximidad de los aeropuertos o la puesta en marcha de nuevos sistemas de transporte, como es el caso del tren de alta velocidad, devienen problemas, por el momento, irresolubles que obligan a tomar medidas correctoras como son las pantallas acústicas.

Las pantallas acústicas o pantallas de sonido son instrumentos muy útiles para la atenuación de todos aquellos ruidos generados por fuentes lineales como es el tráfico rodado o los ferrocarriles.

En la Figura 5.57 se observa que parte de la onda sonora se refleja volviendo al lugar de procedencia, otra parte supera la barrera y debido al efecto de difracción se incorpora al medio. Finalmente otra parte se transmite a través de la barrera.

La misión básica de las denominadas barreras reflectantes, normalmente ejecutadas en hormigón o en vidrio, estriba en atenuar el nivel sónico al otro lado de la barrera. Su efectividad crece con la masa de la barrera pero ello, además de encarecer y suponer un peligro potencial, ocasiona un potente impacto visual.

Las pantallas absorbentes son mucho más livianas y permiten formas geométricas que potencian su eficacia. Su principio de funcionamiento consiste en potenciar la absorción a base de minimizar la reflexión y la transmisión. Sin embargo, como se ha comentado, no existen muchos materiales absorbentes susceptibles de ser empleados a la intemperie.

En el punto 22 del DVD adjunto se muestran diversos ejemplos de pantallas acústicas.

5.1. USO DE NEUMÁTICOS USADOS EN PANTALLAS ACÚSTICAS

Los neumáticos usados son uno de los residuos difíciles de reciclar. No obstante su cantidad es importante. Su empleo como pantalla acústica representa una aplicación sencilla y, debidamente recubierta de una capa vegetal, puede constituir una buena solución técnica a la par que reduce el impacto visual que generan todas las pantallas acústicas.

La pantalla se construye por hiladas de neumáticos apilados, superpuestos y colocados ordenadamente uno sobre otro hasta alcanzar la altura necesaria para la reducción del impacto sonoro. En el interior de la pila se coloca un mástil que hace las veces de soporte ordenador a la vez que sujeta e inmoviliza el conjunto. Finalmente se rellena el hueco interior con tierra y se revegeta.

La pantalla así diseñada forma parte de las denominadas apantallamientos volumétricos y esta construcción se halla a medio camino entre una barrera reflectante y otra absorbente. De hecho su principio de funcionamiento responde más al modelo de un muro aislante ya que la masa es tan grande que no permite que ninguna onda sonora lo atraviese.

Figura 5.58. Pantalla acústica absorbente para exteriores.

La firma ATRI construye pantallas acústicas absorbentes, como la que muestra la Figura 5.58 a partir de restos de fragmentación de automóviles, en especial la fracción de gomas y plásticos.

5.2. USO DE OTROS MATERIALES PARA LA FABRICACIÓN DE PANTALLAS

La normativa vigente en numerosas partes, en la actualidad un numero creciente de ayuntamientos ha forzado a emplear materiales razonablemente absorbentes para su empleo como elementos de corrección de la contaminación acústica.

La Figura 5.59 muestra unos bloques de hormigón aligerado, pero con una resistencia suficiente para comportarse como un elemento estructural, que contiene una ranura en la parte central.

Cuando se trata de proteger un espacio químicamente agresivo o muy húmedo, como sería el caso de una piscina se emplea la variedad B, es decir sin nada más. Sin embargo en espacios protegidos, como seria el interior de una nave industrial se usa la variedad A, que como se aprecia tiene instalado un panel absorbente de fibra en su interior. La capacidad de absorción sería prácticamente del 100% si en lugar de un panel se rellenara toda la cavidad de fibra de vidrio.

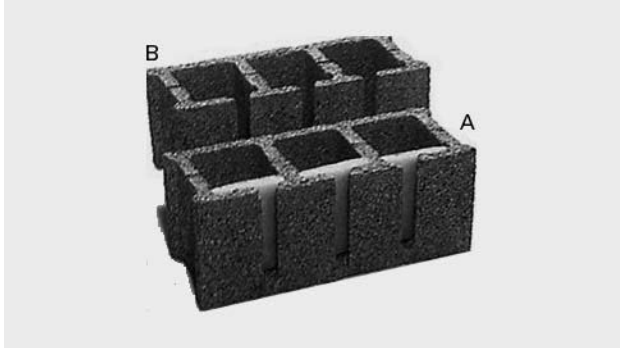


Figura 5.59. Elemento para protección acústica.

Desde el punto de vista de los residuos, un elemento residual que presenta una perfecta insonorización son los envoltorios o cajas de huevos. Se hallan fabricados con fibras de papel que hace del conjunto una pared fina pero porosa (una prueba sencilla pero efectiva consiste en aplicar los labios a la pared e intentar soplar: cuanto menor esfuerzo que haya que hacer para hacer fluir el aire, mejor absorbente acústico). En el caso de la caja de huevos, la particular forma geométrica, ayuda a mantener la consistencia mecánica, que debido a su pequeño espesor sería mecánicamente inestable pero, además la forma piramidal contribuye a reflectar y absorber la onda. Las cámaras anacoides se revisten de materiales de esta geometría.

En el caso de protección de locales interiores la gama de materiales absorbentes, fabricados con residuos, es cada día más abundante, como muestra la Figura 5.60.

Figura 5.60. Elementos para paneles absorbentes.

En la Figura 5.60, el panel de la izquierda se halla fabricado con ASR (Residuos de la Fragmentación de Automóviles) que están compuestos esencialmente de textiles, gomas, papeles y plásticos. El panel central se halla fabricado con residuos de corcho y, el de la derecha con residuos de madera procedentes de la fabricación de mueble.

En el punto 23 del DVD adjunto se muestran diversos ejemplos de materiales usados para la fabricación de paneles absorbentes de ondas acústicas.

5.3. RUIDO Y SALUD

Cada día existen pruebas científicas más evidentes de que hay una correlación entre el ruido y la salud, en particular por lo que afecta a la sordera. Además el

ruido es uno de los parámetros que provoca más quejas y malestar por parte de los ciudadanos.

En el Libro Verde sobre la futura política ambiental en la lucha contra la contaminación acústica, la Comisión Europea se refiere al ruido ambiental como uno de los grandes problemas ambientales en Europa. En consecuencia, la Directiva 2002/49/CE, de 25 de junio de 2002, del Parlamento Europeo y la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, sobre el ruido y el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, que aprueba el Código Técnico de Edificación, proponen la adopción de una serie de medidas para evitar, prevenir o reducir los efectos nocivos de la exposición al ruido.

El exceso de ruido proviene de diferentes fuentes, pero en líneas generales, se puede afirmar que en los países industrializados:

- El 80% se debe a los vehículos a motor, de ahí la importancia que se le ha concedido a la fabricación de pantallas acústicas.
- El 10% procede de las industrias, lo que corresponde más a un tema de seguridad e higiene en el trabajo.
- El 10% restante a locales públicos, a talleres, bares, etc.

El parque automovilístico español supera los 16 millones de vehículos, lo que da una cifra de la importancia del problema. Según un informe del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid es una de las ciudades más ruidosas de España. Valencia registra una media de 73,3 decibelios. Otro estudio, realizado por la escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Salle (Barcelona) desvela que la mitad de los barceloneses entre 14 y 27 años sufren deficiencias auditivas irreversibles como consecuencia del ruido urbano y ciertos hábitos de riesgo, como la música a alto volumen.

Durante el día se suele experimentar malestar moderado a partir de los 50 decibelios y fuerte a partir de los 55 dBA. Las personas sometidas de forma prolongada a ruidos que hayan perturbado y frustrado sus esfuerzos de atención o concentración suelen presentar los siguientes síndromes: cansancio crónico, tendencia al insomnio, enfermedades cardiovasculares (se ha comprobado que las personas que están sometidas a más de 65 decibelios en períodos diurnos tienen una probabilidad de un aumento del 25% en el riesgo de ataques cardíacos). La Tabla 5.28 muestra los niveles sonoros, los efectos y las fuentes.

La sordera permanente esta producida, bien por exposiciones prolongadas a niveles superiores a 75 dBA, bien por sonidos de corta duración de más de 110 dBA, o bien por acumulación de fatiga auditiva sin tiempo suficiente para la recuperación.

Tabla 5.28. Nivel de ruido. Efectos y posibles causas

Decibelios	Efectos	Posibles fuentes
30-55	Reacciones psíquicas. Dificultad en conciliar el sueño. Pérdida calidad sueño.	Ordenador personal, conversación normal.
55-75	Dificultad en la comunicación verbal. Probable interrupción del sueño.	Interior restaurante, aspiradora, televisor a cierto volumen, camión de recogida de basura.
75-100	Aumento de las reacciones psíquicas y vegetativas. Peligro de lesión auditiva.	Interior discoteca, motocicletas sin silenciador, vivienda cercana aeropuerto, bocinas, etc.
100-130	Lesiones en células nerviosas. Dolor y trastornos graves.	Avión sobrevolando el edificio.

6. Materiales ecológicos para la construcción

Antes de nombrar, y definir, los denominados materiales ecológicos es conveniente hacer una referencia a los materiales peligrosos y tóxicos que, lógicamente deben ser excluidos de entrada de esta lista y que con harta frecuencia, se usan en la edificación. Entre ellos es preciso distinguir los que destacan por su peligrosidad.

- En la construcción y/o deconstrucción: Tal es el caso de los materiales ignífugos (mal llamados aislantes) fabricados con asbestos o los fibrocementos que contienen gran cantidad de amianto, ciertas pinturas y barnices, aislamientos de poliuretano expandido con CFC, etc.
- En servicio: Como determinados barnices y pinturas. Radiaciones emitidas por materiales radioactivos presentes en los materiales en estado natural (el uranio natural y sus descendientes, isótopos radioactivos, K^{40}, presentes en algunas arcillas, etc.). En este apartado también cabe citar los problemas derivados de accidentes sobre ciertos materiales de construcción (formación de fosgeno en el incendio de ciertos plásticos).

Una vez hecha la alusión a la toxicidad de los materiales se pueden citar una lista de criterios que deben servir como guía para la selección de los materiales para una edificación ecológica, como:

- Prescindir, en lo posible, de los materiales compuestos. Estos suelen presentar graves problemas de separación durante la deconstrucción y, por tanto, para su reciclaje.
- Dar preferencia absoluta a los materiales reciclados frente a los «vírgenes» (La subbase de una carretera puede realizarse con escoria metalúrgica procedente de horno eléctrico en lugar de usar árido machacado procedente de una cantera).
- Valorar el análisis energético de los materiales, a partir de su origen (así la energía asociada a una jácena de madera es considerablemente inferior a otra, que tenga el mismo momento de inercia, fabricada en acero).
- Materiales que liberan con facilidad metales pesados al medio. (Basta citar, por ejemplo, las tuberías de plomo).
- Atender a la forma de suministro de los materiales de construcción. En este sentido se debe procurar la reutilización de los embalajes.
- Tener en cuenta el origen de las materias primas utilizadas para la elaboración del material de construcción. (Un revestimiento de piedra natural puede considerarse como un material reutilizable, mientras que uno de plástico decorado procede de una fuente de recurso finito. Obviamente no se valora el empleo de especies prohibidas, como ciertos tipos de maderas tropicales).
- Solicitar, cuando este disponible, el ciclo de vida del material a emplear. Con frecuencia un material «natural» puede ser menos «ecológico» que uno reciclado.
- Valorar la eficiencia en todo el proceso industrial de elaboración: extracción, fabricación y acabado. En particular al carácter no contaminante del mismo.
- Durabilidad del material en el tiempo.

6.1. SOSTENIBILIDAD DE LOS MATERIALES CERÁMICOS

La sensibilización creciente respecto a los problemas medioambientales concernientes a la construcción, puesto que este sector genera una serie de impactos, que se pueden resumir en:

- El sector de la construcción consume cerca del 40% de los recursos minerales del planeta. (Debe entenderse la construcción como la edificación, las obras públicas, las carreteras, etc.).
- Sin contar la energía precisa para la fabricación de los propios materiales de construcción, la vivienda acapara casi una tercera parte del consumo total de energía para su funcionamiento (Principalmente en calefacción y acondicionamiento).
- El mal aislamiento provoca que casi la mitad de las emisiones de CO_2, NO_x y SO_x procedan de este mal funcionamiento. Estos gases son de efecto invernadero y contribuyen a la lluvia ácida.
- Entre el 5 y el 8% de los residuos generados proceden de este sector.

En consecuencia no es de extrañar que buena parte de los incentivos y subvenciones que conceden los gobiernos vayan encaminados a aplicar medidas que contribuyan a reducir los impactos ambientales.

En principio la comparación de los materiales cerámicos con otros sustitutivos arroja buena puntuación ya que el balance es claramente favorable en apartados tan significativos como:

- Buena capacidad de aislamiento térmico, siempre, claro esta, que se usen materiales con probada eficacia aislante (No todos los productos cerámicos son buenos aislantes térmicos).
- Seguridad en la construcción. Por lo que hace referencia a la prevención de incendios.
- Duración en el tiempo. Los materiales cerámicos son resistentes a la abrasión y corrosión procedentes de los agentes atmosféricos.

- Características mecánicas aceptables para el destino (Muchas legislaciones imponen restricciones al empleo de materiales cerámicos como elementos resistentes. Sin embargo, la mayoría de los productos cerámicos cumplen, con creces, los mínimos exigidos).
- Bajo mantenimiento de los edificios fabricados con materiales cerámicos.
- Reciclabilidad. Esta propiedad es la que permite fabricar cerámica, u otro material, como árido para hormigón, a partir de residuo de cerámica.

6.1.1. Análisis del ciclo de vida

Hasta fechas muy recientes la elección de un material de construcción venia determinado por imperativos de índole económica. Hoy en día se tiene la tendencia a realizar un estudio más amplio y analizar el impacto que el uso de un determinado material tendrá sobre el entorno desde su fabricación, instalación, uso y reconstrucción.

La preocupación ambiental sobre las propiedades que deben tener los materiales de construcción ha llevado a los técnicos a desarrollar los denominados «Ecobalances» o «Análisis del Ciclo de Vida». Estas son herramientas que de manera científica e imparcial permiten dilucidar el impacto que un determinado material tiene sobre el medio ambiente.

En síntesis, el análisis del ciclo de vida consiste en realizar un inventario de las materias primas y de los procesos de fabricación que intervienen en el ciclo productivo de los materiales. Si además se estudia el impacto que el material tiene una vez ha concluido su vida útil y deviene residuo, lo que recibe el nombre «De la Cuna a la Tumba», es posible valorar todos los parámetros ambientales.

El Ecobalance tiene en cuenta desde el impacto producido en la cantera hasta el destino del material cuando la obra sea derribada, pasando por el transporte y todas las etapas de fabricación. Este libro destina un capitulo a estudiar con detalle estos aspectos.

6.2. LA PROBLEMÁTICA DE LOS MATERIALES COMPUESTOS

Un material compuesto o «composite» es una mezcla coherente entre dos o más materiales de diferente tipo, composición y estructura. El material continuo se denomina matriz y el material disperso puede ser partículas, fibras, etc. Desde el punto de vista estructural tanto la matriz como la fase dispersa pueden ser cristalinos o amorfos.

Su creación obedece a la necesidad de potenciar una determinada característica. Así por ejemplo, a una matriz de poliéster, que no soporta muy bien las solicitaciones de tracción, se le añade una fibra de vidrio para reforzarlo y potenciar las propiedades del conjunto.

Sin embargo los problemas suelen aparecer a la hora del reciclaje. En la mayoría de los casos es imposible la separación y ello complica el reciclaje. De hecho en muchas ocasiones se debe buscar una vía de valorización para el compuesto tal y como está.

En general se aconseja utilizar metodologías cruzadas (energéticas, ambientales e higiénicas) para evaluar la calidad ecológica de los materiales, recomendándose un balance global. Una herramienta útil para la elección de los materiales ecológicos es el distintivo de calidad ambiental o la etiqueta ecológica que disponen algunos materiales.

En el punto 24 del DVD adjunto se muestran ejemplos de mobiliario urbano fabricados a base de plásticos reciclados.

Bibliografía

AGUILAR, N. Producción de celulosa y papel a partir de bagazo de caña de azúcar. *Revista Residuos*, 2006, núm. 93.

AZIZ, M. *et al*. Lightweight concrete using cork granules. Pos.: *International conference on materials of construction for developing countries*. Bangkok. Vol. I, 1978.

BARCELÓ, G. *La energía en la edificación: Política energética y ahorro de energía*. Editorial Index. Madrid.

BOTERO, E. *et al.* Dimensionamiento y evaluación económica de una planta de producción de áridos ligeros con aprovechamiento de energía residual. *Revista Residuos*, 2005, núm. 85.

CADAVID, G. *et al. Desarrollo y caracterización de material compuesto de polipropileno reforzado con fibra de fique*. Universidad Pontificia Bolivariana - GINUMA. Medellín (Colombia), 2005.

BRITISH STANDARD INSTITUTION. Specification for lightweitgh aggregates for concret. *London BS* 3793, 1971.

Cátedra de Tecnología Papelera. *Materiales complejos: Envase y embalaje flexible*. Barcelona. ETSII de Terrassa, UPC.

CLEGG, P. *New low-cost sources of energy for the home*. Garden Way, 1975.

COLOM, J. *Estudio de la madera para la fabricación de pasta. Materias Papeleras*. Barcelona. ETSII Terrassa, 1983.

CUSIDÓ, J. A. Valorización cerámica de fangos. *II Fórum Ambiental Exporecycling'98*. Barcelona, 1998.

CHONGRAK POLPRASERT. *Organic waste recycling*. Chichester, John Wiley & Sons. 1996.

DEGRÉMONT . *Water treatement handbook*, 6th edition. París, Lavosier Publishing Inc. 1991.

DEVANT, M. *Nuevos materiales cerámicos para la construcción mediante revalorización de lodos de aguas residuales urbanas*: (Barcelona) Proyecto Ecobrick®. UPC, octubre, 1997.

EPA. *Process design manual for dewatering municipal wastewater sludges*. U.S. Cincinati, 1982.

ELIAS, X. *Elemetos de diseño y optimización de sistemas de incineración de residuos*. (Medellín, Colombia) Universidad Pontificia Bolivariana, (2001).

ELIAS, X. *La fabricación de materiales cerámicos* (en imprenta).

EPA. *Sewage sludge technical regulation*s. Washington, EPA Federal Register. 1989.

GARCÍA HORTAL, J. C*onstituyentes fibrosos de pastas y papeles*. Barcelona. Esc. Tec. Sup. Ing. Ind. de Terrassa. UPC.

GARCÍA, A. *Ruido de tráfico urbano e interurbano. Manual para la planificación urbana y la arquitectura*. Madrid, CEOTMA/MOPU. Manual, 4. 1983.

GARRIDO, A. *et al*. Utilización de arcilla expandida como relleno de lechos sumergidos aireados para el tratamiento de aguas residuales procedentes de la industria conservera. *Tecnología del Agua*, 2005, núm. 263.

GENERALITAT DE CATALUNYA. Departament de Medi Ambient. *Programa de tractament de fangs de les depuradores d'aigües residuals urbanes*. Barcelona, 1996.

GOUMANS, J. J. J. M. *et al. Waste materials in construction*. Amsterdam. Elsevier.

HERMITE. *Treatment and use of sewage sludge and liquid agriculture wastes. Amsterdam*. Elsevier, 1991.

KETTANI. *Direct energy conversion*. Amsterdam. Addison Wesley. 1970.

KRAUSE, H. H. y PENNINGER, J. M. L. Conversion of polymers wastes and energy. *Chem Tec Publishing*.

LÓPEZ , D. *et al.* El reciclado del papel. Beneficios del uso de la fibra reciclada (I y II). *Ingenieria Química*, 2004. Noviembre.

MARK, R. E. *Fiber structure. En: Handbook of physical and mechanical testing of paper and paperboard*. Vol. 2 New York, Marcel Dekker, 1984.

MÁRQUEZ, P. J. et al. Los residuos de la industria del mueble de madera (I y II). *Ingeniería Química* (2003).

MCCABE, W. L., SMITH, J. C. *Operaciones básicas de ingeniería química*. Barcelona, Reverté. 1975.

METHA, P. K., Propierties of blended cements, cements made from rice husk ash. J. *Amer. Con. Inst.* 1980. 74, 440-442.

PERRY, R., CHILTON, C. H. *Manual del ingeniero químico*. McGraw-Hill. New York, 1982.

RICHARD WILLIAMS, J. *Tecnología y aplicaciones de la energía solar*. Madrid, Librería Técnica Bellisco, 1976.

ROBERY, P. C. *The use of domestic incinerator ash as an aggregate in concret*. PhD. Thesis. UK, Leed University, 1981.

RODRIGUEZ, M. A. *et al.* Identificación de la composición óptoma del adobe como material de construcción de una escuala en Cuba. *Materiales de Construcción*, 2006. Vol. 56, 282.

SHOTTS, R. O. Waste glass as an ingredient of Lightweight agregate. Pos: *Material waste utilization symposium*. Chicago, 1972.

SWAMY, R. N. *et al. New concrete materials*. Vol. I. Londres. Surrey University Press.

VELO, E. Potencial energético y sistemas de secado. *II Fórum Ambiental Exporecycling'98*. Barcelona, 1998.

VILLAREAL, N. et al. Desarrollo de materiales termoplásticos reforzados con fibras agro-vegetales para la obtención de componentes de automoción. *Revista de Plásticos Modernos*, 2003. Vol. 85, núm. 564.

WAINWRIGHT, P. J. y BONI, S. P. K. Artificial aggregate from domestic refuse. Concrete Vol. 15. No. 5, 1981.

YÁÑEZ , G. *La energía solar en la edificación.* Madrid. Ministerio de la Vivienda, 2003.

Residuos destinados a la fabricación de materiales densos

6

Xavier Elias

ÍNDICE

1. Introducción 341
1.1. Tecnologías aplicables 341
1.2. Valorización de residuos densos inorgánicos 344
2. Contribuciones de la cerámica a la valorización de los residuos 348
2.1. Determinación de la porosidad en la matriz cerámica 350
2.2. Residuos de la industria del vidrio y de la cerámica 351
2.3 Inertización de escorias de incineradoras de RSU 357
2.4. Tratamiento de residuos de huesos 359
2.5. Residuos de la incineración de RSU y de fangos de EDAR 360
3. La industria del aluminio 364
3.1. La bauxita y el proceso de producción del aluminio 364
3.2. La obtención del aluminio 367
3.3. Valorización de escorias salinas de aluminio 367
4. Valorización de residuos con alto contenido en asbestos 369
4.1. Posibilidades de valorización 369
4.2. Posibilidades de fabricación de refractarios con asbestos 371
5. Inertización de lodos de la industria de acabados de superficies 371
5.1. Uso de residuos de cromo en la industria cerámica 372
5.2. Valorización de lodos de anodizado 372
5.3. Valorización de polvos de lijado de barnices y madera 373
6. La industria del cemento como vía de valorización de residuos 373
6.1. La naturaleza de los cementos 374
6.2. La valorización de residuos en los hornos de clínquer 377
6.3. Consecuencias ambientales de la incorporación de residuos al clínquer 380
6.4. Contribución del cemento a la valorización de residuos 382
7. Residuos con propiedades puzolánicas 386
7.1. Actividad puzolánica 387
7.2. Empleo de residuos de bauxita como puzolanas artificiales 388
7.3. Propiedades puzolánicas de residuos de la industria azucarera 390
7.4. Escorias metálicas como material puzolánico 391
7.5. Propiedades puzolánicas de la sílice residual 394
8. Uso de cenizas volantes de centrales termoeléctricas 395
8.1. Características de las cenizas volantes 396
8.2. Contribución de las cenizas volantes a las características del hormigón 397
8.3. Mezclas de cenizas volantes con cal y yeso . 400
8.4. Bloques de arcilla estabilizada con cenizas volantes 400
8.5. Bloques de hormigón aligerados 401
8.6. Otras aplicaciones de las cenizas volantes 401
9. Valorización de lodos de las ETAP's (Estaciones de Tratamiento de Agua Potable) 404
9.1. Valorización cerámica de lodos de ETAP . 405
9.2. Valorización de lodos de graveras 406
10. Valorización de residuos de la industria metalúrgica 407
10.1. Mejora de la resistencia al fuego de hormigones 407
10.2. Aplicación de los fluidos supercríticos a la valorización 408

10.3. Bloques de escoria 409
10.4. Ladrillos de cal con adición de escoria de fundición..... 410
10.5. Otras aplicaciones de residuos metalúrgicos 410
11. Valorización de residuos destinados a la fabricación de acumuladores de calor 411
11.1. Acumulación de calor y aislamiento térmico..... 412
11.2. Capacidad de almacenamiento de calor de los materiales..... 413
11.3. Aplicaciones de la acumulación de calor. 413
11.4. Almacenamiento térmico por cambio de fase 417
12. Sumideros y valorización del CO_2 419
12.1. El ciclo del carbono..... 420
12.2. Almacenamiento de CO_2. sumideros minerales 422
12.3. Sistemas orgánicos de captura de CO_2.... 423
Bibliografía..... 426

RESUMEN

La valorización de los residuos que se trata en este capítulo es de naturaleza esencialmente inorgánica, por tanto parece lógico que se les aplique unas tecnologías de reciclaje que permitan su conversión en materiales de construcción, o similares, básicamente densos.

Como sea que muchos de estos residuos responden a una caracterización semejante a las materias primas usadas para la fabricación del cemento y la cerámica, se hace hincapié en estos modelos de producción para comprender la valorización de los residuos incluidos en este capítulo.

Finalmente y debido a su importancia estratégica y su relación con la valorización y/o confinamiento se hace referencia a las técnicas de confinamiento del CO_2 en relación al Protocolo de Kyoto.

1. Introducción

Los residuos que se contemplan en este capítulo tienen como denominador común que son de naturaleza, esencialmente, inorgánica. Así pues, cuando sean sometidos a determinados procesos de valorización, no se producirá aquella «disminución de masa» tan particular de los materiales orgánicos al producirse un cambio de fase y, en consecuencia, no se creará porosidad interna.

Los materiales de construcción susceptibles de ser fabricados con esta tipología de residuos suelen ser densos, por tanto serán materiales para la construcción de elementos de elevado peso específico y muchos de ellos buenos conductores y acumuladores de calor.

Esta última propiedad, la acumulación de calor, se corresponde con una de las características apreciadas en la arquitectura bioclimática, muy en particular en las latitudes de clima frío.

1.1. TECNOLOGÍAS APLICABLES

Mas que citar tecnologías aplicables se debería hablar de tecnologías recomendables y forman parte de los denominados procesos fisicoquímicos. A los efectos que interesan se pueden limitar a:

- Mezclas con cemento y/o cal.
- Ceramización.
- Vitrificación.

La Figura 6.1 delimita, sobre un diagrama triangular, las diferencias esenciales que distinguen las tres tecnologías.

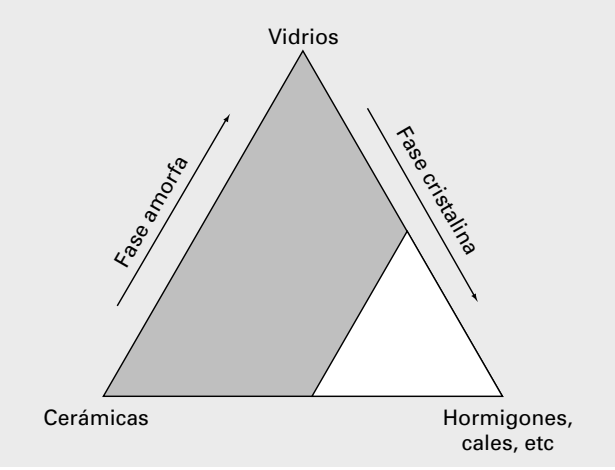


Figura 6.1. Tecnologías recomendables para la valorización de residuos inorgánicos.

A grandes rasgos se podría caracterizar cada una de estas tecnologías en función de la fase amorfa, o su complementaria, la fase cristalina que posee. Como introducción también hay que decir que la cerámica y el vidrio están mineralógicamente mucho mas cercanos entre sí que las mezclas con cemento y cal. Sin embargo se han incluido en un mismo diagrama en atención a que ésta es la práctica habitual en la ciencia de la valorización de residuos.

En los materiales existen dos tipos principales de enlaces atómicos: los enlaces primarios o fuertes y enlaces secundarios o débiles. Esta clasificación sirve perfectamente a los fines de valorización que persigue este capítulo. Los enlaces primarios se subdividen en iónicos, covalentes y metálicos y los secundarios a menudo se llaman de Van der Waals.

Los enlaces iónicos se pueden formar entre elementos muy electropositivos (metálicos) y elementos muy electronegativos (no metálicos). En el proceso de ionización, los electrones son transferidos desde los átomos de los elementos electropositivos a los átomos de los elementos electronegativos, produciendo cationes y aniones. La naturaleza del enlace es debido a la fuerza de atracción electrostática entre iones con carga opuesta. Cuando los iones se aproximen cada vez más, aparecerán fuerzas repulsivas entre las nubes electrónicas, con lo que se llegará a un equilibrio (que determinará la distancia interatómica).

Los enlaces covalentes se forman entre átomos con pequeñas diferencias de electronegatividad y ubicados muy próximos en la tabla periódica. En este caso, los átomos generalmente comparten sus electrones externos con otros átomos aunque están firmemente sostenidos. Este tipo de enlace es el que prevalece en las tecnologías antes enunciadas.

En los enlaces metálicos, los átomos se encuentran empaquetados muy juntos en una ordenación sistemática o estructura cristalina. Los átomos están tan juntos que sus electrones externos son atraídos por los núcleos de sus numerosos vecinos. Los electrones, por lo tanto, no están firmemente sujetos a un núcleo en particular, con lo que se crea una nube electrónica de carga de baja densidad.

Por último, en los enlaces secundarios la génesis de la fuerza es la atracción de los dipolos eléctricos contenidos en los átomos o en las moléculas. Éstos crean momentos dipolares oscilantes, por distribu-

ción de carga asimétrica, y permanentes, en el caso de moléculas polares.

Los diferentes tipos de enlace conllevan ciertas características gracias a las cuales se pueden agrupar los materiales. Las cerámicas se basan en compuestos químicos de composición fija, formados por óxidos metálicos y no metálicos. Tienen una gran variedad de composiciones químicas que se refleja en una gran diversidad de estructuras cristalinas y amorfas. Las propiedades más destacadas son: densidad relativamente baja, resistencia mecánica moderadamente elevada, rigidez muy alta, gran fragilidad, conductividad eléctrica y térmica bajas y estabilidad química muy elevada. Su nombre proviene del término griego «keramikos», que significa «quemado», dado que su proceso normal de obtención requiere un tratamiento térmico o, en términos cerámicos, una cocción a alta temperatura.

Las cerámicas incluyen gran diversidad de materiales utilizados en una gran variedad de sectores: los productos estructurales derivados de la arcilla (ladrillos, baldosas, tejas, azulejos), las porcelanas (vajillas, sanitarios), las cerámicas refractarias y aislantes (revestimiento de hornos), las cerámicas abrasivas (para afilar herramientas), los vidrios (puertas, ventanas, claraboyas...) y los materiales especiales para cerámica técnica. Además, las cerámicas participan en la elaboración de materiales compuestos, ya sean fibras de refuerzo, como partículas o materiales compuestos cerámica-cerámica.

1.1.1. La cerámica

La definición de un material cerámico es siempre compleja y hay que recurrir a sus principales etapas de fabricación para facilitar la comprensión de la propia definición:

- *En crudo.* La pasta cerámica, en crudo, puede definirse como un conglomerado de diversos minerales (los minerales, en estado son natural son esencialmente de naturaleza cristalina) que se mantienen unidos gracias a las fuerzas de Van der Waals que genera la plasticidad durante las sucesivas fases de: trituración, amasado, conformado y secado.
- *Durante la cocción.* El calor suministrado durante esta fase provoca el desmoronamiento de la estructura cristalina de la mayoría de los minerales de arcilla y la aparición de una fase vítrea (amorfa), que a esta temperatura es líquida, que se va introduciendo en los intersticios existentes entre partículas.
- *En cocido.* La cerámica está formada por un conjunto de minerales cristalinos no transformados (como acontece con el cuarzo en la cerámica estructural), otros que han recristalizado a partir de la fase vítrea, otros amorfos, poros de todo tipo y todos ellos aglomerados por la fase vítrea.

Naturalmente se trata de una definición genérica que debe ajustarse a cada uno de los innumerables tipos y clases de materiales cerámicos. Desde el punto de vista de la valorización de residuos, éste puede ser un «mineral más», lo importante es comprender que durante la etapa de cocción los minerales que integran la arcilla van a interactuar con el residuo hasta integrarlo y quedar formando parte de un todo.

Los materiales cerámicos han ido adquiriendo preponderancia con el tiempo a medida que se han requerido prestaciones mas sofisticadas. Así, en orden a la presencia de fase cristalina o amorfa, se pueden citar:

- *Cerámicas resistentes a altas temperaturas.* Se caracterizan por tener una fase cristalina mayoritaria. A elevadas temperaturas, a partir de los 600 ℃, los aceros convencionales y las aleaciones metálicas difícilmente resisten las solicitaciones mecánicas en aplicaciones como bolas para rodamientos, ejes, válvulas, juntas, etc.
- *Cerámicas refractarias.* También tienen una fase cristalina mayoritaria. Como las empleadas para la fabricación de los álabes de turbinas, toberas para quemadores, piqueras para la salida de metales fundidos, etc.
- *Cerámicas aislantes: (Para altas temperatura).* Sus aplicaciones se han explicado extensamente en el capítulo anterior. Sabido es que el aislamiento térmico se consigue a base de crear poros en cuyo interior queda aire ocluido. Los materiales que permiten fabricar aislantes aptos para soportar temperaturas superiores a los 1.600 ℃, son cerámicas muy especiales.
- *Vitrocerámicos:* Son materiales policristalinos al cien por cien pero, a diferencia de los primeros tipos de cerámica antes enumerados, los vitrocerámicos surgen a partir de una fusión total de la mezcla, de ahí su interés desde el punto de vista del tratamiento de residuos. Son muy resistentes al choque térmico. Se usan en la fabricación de muros cortina, placas para co-

cinas, materiales para el confinamiento de residuos de alta radioactividad, etc.
- *Cerámicas de construcción.* También denominada cerámica estructural o roja, ladrillos, azulejos, etc. La fase cristalina es del mismo orden que la amorfa, de ahí el gran interés para la valorizavción de residuos.

El DVD adjunto, en el punto 1, se muestra una fotografía (realizada en el microscopio electrónico) de una estructura cerámica. Para más información acerca de la microestructura se puede consultar el contenido del master a distancia «Tecnología y ciencia cerámica» escrito por el Dr. Xavier Elias para la Fundación Universitaria Iberoamericana, en www.funiber.org

1.1.2. Los vidrios

Los vidrios, en contraste con los materiales cerámicos cristalinos, abarcan una amplia gama de composiciones. La sílice fundida necesita de la adición de óxidos para trabajarla más fácilmente, con lo que, si se analizan estos aditivos, se encuentran:

- Formadores de vidrio, o del retículo, como SiO_2, B_2O_3, GeO_2, etc.
- Modificadores del retículo o fundentes (en cantidades limitadas) como los óxidos alcalinos y alcalinotérreos.
- Intermedios, o anfóteros, que ayudan a estabilizar el retículo de la red del vidrio.

La esencia de la formación de un vidrio estriba en la acción de los fundentes, también llamados modificadores de retículo, que desestabilizan la sólida estructura de los enlaces del formador de vidrio, el SiO_2. Cuando ello se ha conseguido el conjunto funde de manera homogénea y después se enfría y rigidiza fuera del horno.

Desde el punto de vista cerámico el factor que más diferencia a un vidrio de una cerámica es que el vidrio siempre es un material amorfo y no tiene ninguna fase cristalina, o recristalizada (Precisamente la intervención de los óxidos anfóteros consiste en proporcionar elementos que impidan la desvitrificación). Otro elemento diferenciador es que el vidrio (al fundir toda la masa) pierde completamente su geometría inicial y no la recupera.

Las materias primas usadas para la fabricación del vidrio común son la arena: cuarzo, los fundentes: carbonatos de calcio y de sodio y un poco de arcilla seleccionada.

La variedad de vidrios comerciales es inmensa ya que es posible incorporar diferentes óxidos en su red que aporten propiedades diferentes al vidrio de silicato, por lo tanto un vidrio, por definición, no tiene una fórmula química determinada. Se comprende que, desde el punto de vista de la valorización de residuos, los vidrios despierten gran interés.

1.1.3. Los cementos

En términos muy elementales se podría definir una cerámica como aquel material que se forma gracias a una serie de reacciones que desencadenan las fases amorfas, líquidas a alta temperatura, y unas pocas que tienen lugar en estado sólido. En un vidrio, la totalidad de las reacciones tienen lugar a partir de fases amorfas pero en el clínquer la totalidad de las reacciones se desarrollan en estado sólido y a partir de materiales cristalinos.

Las reacciones en estado sólido presentan una cinética muy lenta y ello ha de compensarse con un aumento de la temperatura. Así mientras una cerámica convencional se consigue a temperatura próxima a los 1.000 ℃, un horno de clínquer sobrepasa los 1.300 ℃.

En muchas especies cerámicas las fases cristalinas se mantienen unidas por la fase amorfa, así se podría considerar el vidrio como un cemento a alta temperatura; sin embargo, hay una amplia clase de cementos cuya mezcla puede modelarse a baja temperatura y donde el agua propiciaría el enlace produciéndose una nueva fase en toda la masa. Este es el campo de los cementos y yesos comunes. Por lo general es muy importante regular la cantidad de agua, cuyo exceso podría debilitar su estructura.

Las materias primas usadas para la fabricación del clínquer para el cemento Portland son la caliza, la arcilla y ligeras cantidades de correctores de formulación (arena, cal, mineral de hierro). Las materias primas se trituran finamente y se introducen en el horno de calcinación. A las temperaturas de trabajo, la caliza (CO_3Ca) se descompone. El óxido de cal resultante es bastante refractario, no reacciona, pero si puede ser fácilmente atacado por los productos resultantes de la descomposición de la arcilla. Así el SiO_2, procedente de la descomposición de los silicatos de los diversos minerales de arcilla, es activo y se combina con el CaO. A la vez los restos de la destrucción de la arcilla van formando diversos compuestos, cristalinos, con el CaO presente. El

material sintetizado se denomina clínquer y mineralógicamente está constituido por silicatos y aluminatos de fórmulas complejas, entre los que cabe destacar:

- Silicato tricálcico: SiO_2. $(CaO)_3$
- Silicato bicálcico: SiO_2. $(CaO)_2$
- Aluminato tricálcico: Al_2O_3. $(CaO)_3$
- Aluminato-Ferrito-tetracálcico: Al_2O_3. Fe_2O_3. $(CaO)_4$

Al clínquer así obtenido se le añade una cantidad de yeso (puede ser yeso FGD residual), y con frecuencia cenizas volantes de centrales termoeléctricas (otro residuo), y al material fabricado se le llama cemento Portland. De manera similar se fabrica el cemento aluminoso.

A diferencia de la cerámica y el vidrio que salen de fábrica como materiales terminados, el cemento es la materia prima para la fabricación de los hormigones y morteros. Para que ello se produzca debe intervenir el fenómeno del fraguado o del endurecimiento de la mezcla cemento-áridos-agua.

El fraguado estriba en una serie de reacciones complejas de hidratación que tienen lugar entre los componentes del cemento por la acción del agua. Los principales compuestos del material fraguado son la portlandita ($Ca(OH)_2$) y el complejo C-S-H (tobermonita: C3-S2-H3), con cantidades, aproximadas, del 20% y 65% siendo el resto otras fases.

La Tabla 6.1 reproduce la composición química media de un típico cemento Portland en comparación con un aluminoso (Electroland). De hecho a este último cemento no debería llamársele así puesto que no tiene aditivos, es clínquer 100%. Otro tipo de cemento refractario es el «Secar» compuesto, casi exclusivamente por Al_2O_3 (70%) y CaO (30%).

Tabla 6.1. Composición química de cementos

Óxido, en %	Cemento Portland	Cemento Electroland
SiO_2	19-25	2-3,5
Al_2O_3	5-9	40-42
Fe_2O_3	2-4	8-12
FeO		2,5-5,5
CaO	60-64	38-40
MgO	1-4	
TiO_2		1,5-2
SO_3	1-2	

1.1.4. Cementación vs. Ceramización/ vitrificación

Cementación, sinterización y ceramización son términos que suelen emplearse indistintamente cuando, si bien el objetivo final es el mismo: la unión de las materias primas iniciales de manera más o menos fuerte para lograr un material final, el modo de conseguirlo es muy diferente.

En la cementación el elemento aglutinante es el cemento, en cualquiera de sus variantes, las resinas, los asfaltos, etc. y el medio endurecedor es específico de cada uno. En el caso del cemento es al agua. En la sinterización, término reservado a la obtención de aleaciones metálicas, el elemento endurecedor es la acción simultánea de la presión y la temperatura (En la actualidad esta acepción se ha ampliado a la fabricación de algunos materiales cerámicos, por ejemplo la alúmina sinterizada. Las reacciones son, casi exclusivamente en estado sólido). Mientras que, en el caso de la ceramización el factor desencadenante por excelencia es la temperatura.

Mediante la cementación, se unen las materias primas usando un aglutinante que no requiere cocción o sinterizado. Una resina líquida (como el silicato de sodio, fosfato de aluminio o cemento Portland) recubre las partículas cerámicas y proporciona puentes de unión. La reacción química produce un sólido que mantiene unidas las partículas.

Cuando se añade un residuo al cemento, éste queda encapsulado en la matriz de cemento o de cemento y cal, si se ha usado también lechada de cal, a diferencia de las tecnologías antes citadas, la cerámica y el vidrio donde el elemento extraño (residuo) pasa a formar parte de la composición.

Ni que decir tienen que cualquiera de las tecnologías citadas precisa de una instalación, una mano de obra especializada, un consumo de reactivos, posiblemente unas medidas correctoras y un consumo de energía.

1.2. VALORIZACIÓN DE RESIDUOS DENSOS INORGÁNICOS

A diferencia del capítulo precedente donde el objetivo primordial era lograr una porosidad que dotara al material fabricado con residuos ligeros de propiedades de aislamiento térmico o acústico, la finalidad del presente capítulo estriba en la descripción de la fabricación de materiales de construcción densos por

cuanto, para su elaboración, se han usado residuos de naturaleza inorgánica y densa.

El hecho de tratarse de residuos inorgánicos supone, en el caso de usar la tecnología cerámica, que en las etapas de cocción su masa permanecerá prácticamente inalterable y el objetivo fundamental estribará en confinar los componentes tóxicos que pudieran existir en la matriz cerámica.

El diagrama triangular de la Figura 6.2 reproduce la caracterización de una serie de residuos de naturaleza inorgánica en la simbología usada por la industria cerámica, en el mismo se destacan: los óxidos formadores de vidrio básicamente (SiO_2), los óxidos fundentes (alcalinos y alcalinotérreos) y los óxidos co-formadores de retículo (Al_2O_3).

Las arcillas naturales tienen composiciones que caen dentro de la zona sombreada mayoritaria de la figura, o sea que, desde el punto de vista estrictamente analítico son compatibles con la mayoría de los residuos de tipología inorgánica.

1.2.1. La naturaleza de las arcillas

Puesto que la arcilla es uno de los protagonistas principales de este capítulo como punto de partida en la mayoría de las operaciones de valorización, vale la pena comentar su esencia desde la vertiente mineralógica. La arcilla, principal protagonista de la industria cerámica, es un término petrográfico y como la mayoría de las rocas, esta constituida por un cierto número de diferentes minerales en proporciones variables. La palabra arcilla se emplea con referencia a un material de grano fino (de tamaño inferior a 2 mm), terroso, que se torna plástico al ser mezclado con el agua.

Los minerales que conforman las rocas arcillosas están formados por diferentes átomos y moléculas. Estos minerales, derivados de las rocas aparecen en diferentes estados de evolución dependiendo de cómo les ha afectado el proceso de alteración, transporte y sedimentación. Su naturaleza también dependerá del tipo de roca madre. Pero a pesar de la aparente gran variedad de combinaciones, la abundancia de nueve elementos en la corteza terrestre la limita bastante. La Tabla 6.2 lista estos nueve elementos y su porcentaje en rocas y suelos.

Dos conclusiones se pueden extraer de la tabla anterior: la primera es que esta estructura de elementos es tan remarcable que determina el orden de las evoluciones geológicas en la corteza terrestre

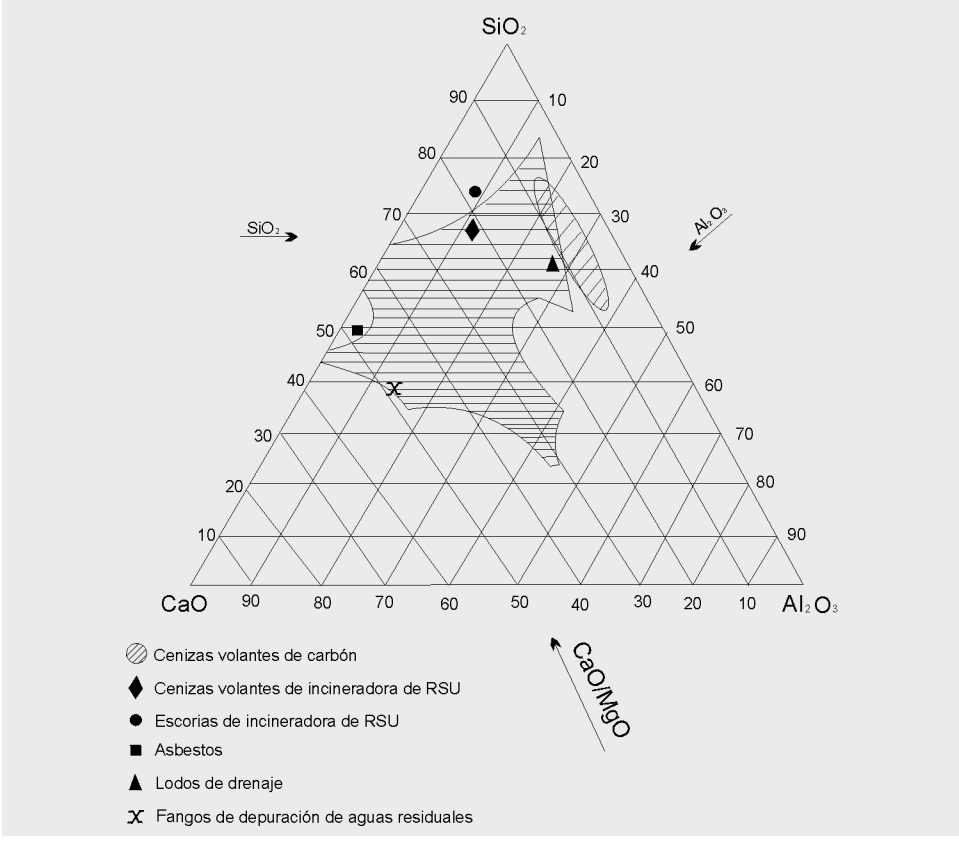


Figura 6.2. Caracterización de algunos residuos en el diagrama SiO_2-Al_2O_3-CaO/MgO.

Tabla 6.2. Abundancia de elementos químicos en rocas y suelos

Elemento (símbolo)	Peso (%) en rocas	Peso (%) en suelos
Aluminio (Al)	8,23	7,2
Calcio (Ca)	4,14	2,4
Hierro (Fe)	5,63	2,6
Magnesio (Mg)	2,33	0,9
Oxígeno (O)	4,40	49,0
Potasio (K)	2,09	1,5
Silicio (Si)	28,15	31,0
Sodio (Na)	2,36	1,2
TOTAL	99,33	95,8

que es, precisamente donde se hallan los minerales de interés cerámico; la segunda es que la composición de suelos sigue a la de las rocas en general, salvo en el caso del carbono y el nitrógeno, que casi no aparecen en rocas pero sí en relativa cantidad en suelos.

La Tabla 6.3 muestra los minerales más comunes que se pueden encontrar en los suelos. Los seis primeros pertenecen al grupo de los silicatos y se denominan minerales primarios porque derivan directamente de la roca madre y no se han formado como resultado de procesos químicos que suelen acompañar a la erosión (los anfiboles y los piroxenos pertenecen al grupo de los inosilicatos). Del 7 al 10 se agrupan los denominados minerales pesados, que también son silicatos con la excepción del rutilo (óxido de titanio cristalizado en el sistema tetragonal; debido a su alto índice de refracción se usa en cerámica como colorante y opacificante. El mineral denominado anatasa es una variedad polimórfica del rutilo), con densidades superiores a los primeros. El grupo del 11 al 23, lo integran los minerales secundarios, que se han formado como resultado de la alteración de los suelos.

Tabla 6.3. Minerales más comunes en suelos

Mineral		Fórmula química	Importancia
1	Cuarzo	SiO_2	Abunda en suelos arenosos y sedimentarios.
2	Feldespato	(Na, K) $[SiO_3\ Al_2O_8]$; o también $CaAl_2O_4[SiO_2]_2$	Abunda en suelos no lixiviados extensivamente.
3	Mica	$K_2Al_2[AlSi_3O_{10}](OH)_2$ Moscovita; o también $KMg_3Al_2[AlSi_3O_{10}](OH)_2$ Flogopita	Fuente de K en muchos suelos de zona templada.
4	Anfiboles	$(Ca, Na, K)_{2,3}(Mg, Fe, Al)_5(OH)_2(Si, Al)_4O_{11}]_2$	Se altera fácilmente a minerales de arcilla y óxidos.
5	Piroxenos	(Ca, Mg, Fe, Ti, Al) $[(Si, Al)O_3]$	Erosiona fácilmente.
6	Olivino	$(Mg, Fe)_2SiO_4$	Erosiona fácilmente.
7	Epidota	$Ca_2(Al, Fe)_3(OH)Si_3O_{12}$	Altamente resistentes a la erosión química.
8	Turmalina	$NaMg_3Al_6B_3Si_6O_{27}(OH,F)_4$	
9	Circón	$ZrSiO_4$	
10	Rutilo	TiO_2	
11	Caolinita	$Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$	Abundan en suelos arcillosos como resultado de la erosión.
12	Esmectita	$M_{0-6}(Al, Fe, Mg)_{4-6}(Si, Al)_8O_{20}(OH)_4$	
13	Vermiculita	$(Mg, Fe, Al)_3(Al, Si)_4O_{10}(OH)_2 \cdot 4H_2O$	
14	Clorita	$(Al, Fe, Mg)_{4-6}(Al, Si, Fe)_4O_{10}(OH,O)_8$	
15	Alofana	$Si_3Al_4O_{12} \cdot nH_2O$	Abundan en suelos derivados de depósitos de cenizas volcánicas.
16	Imogolita	$Al_2SiO_3(OH)_4$	
17	Gibbsita	$Al(OH)_3$	Abunda en suelos lixiviados.
18	Geotita	FeO(OH)	Óxido de Fe más abundante.
19	Hematita	Fe_2O_3	Abunda en regiones cálidas.
20	Ferrihidrita	$Fe_4(OH)_{12}$ a $Fe_5O_3(OH)_9$	Abunda en horizontes orgánicos.
21	Birnesita	$Na_4Mn_{14}O_{27} \cdot 9H_2O$	Óxido de Mn más abundante.
22	Calcita	$CaCO_3$	Carbonato más abundante.
23	Yeso	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	Abunda en regiones áridas.

Así pues, queda claro que se emplea la palabra arcilla para referirse a una materia prima compleja formada por diversos minerales. La Tabla 6.4 reproduce la fórmula química estándar de los principales minerales de arcilla. En general el análisis químico de una arcilla pone de manifiesto la presencia de óxidos no previstos, o con frecuencia indeseable (Como puede ser el Fe_2O_3, o el TiO_2 en ciertas arcillas de interés cerámico) pero difícilmente aclara la caracterización mineralógica de los minerales de arcilla presentes.

Tabla 6.4. Fórmulas químicas de los principales minerales de arcilla

Caolinita	$Al_2[Si_2O_5](OH)_4$
Halloysita	$Al_2SiO_3(OH)_4$ y $Al_2SiO_3(OH)_4 \cdot 2H_2O$
Moscovita	$KAl \cdot 2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$
Montmorillonita	$^1/_2$ $(Ca, Na)_{0\text{-}7}$ $(Al, Mg, Fe)_4$ $[(Si, Al)_8O_{20}]$ $(0H)_4 \cdot nH_2O$
Clorita	$(Mg, Fe)_3(Si,Al)_4O_{10} \cdot (OH)_2 \cdot (Mg, Fe)_3(OH)_4$

El especialista en cerámica sabe que, por regla general, la presencia de álcalis denota baja temperatura de ceramización y la presencia masiva de alcalinotérreos evidencia la presencia de carbonatos.

Lo que es de vital importancia para las aplicaciones de valorización de residuos es conocer la temperatura a la cual se inicia la formación de la fase amorfa en el interior de algunos de los minerales de arcilla que componen la materia prima.

1.2.2. Aplicaciones de las arcillas

Probablemente ningún material extraído de la corteza terrestre tiene tantas aplicaciones como la arcilla. A título de introducción, seguidamente se listan las aplicaciones más usuales de la arcilla:

Cerámica. Para usarla en cerámica sus propiedades básicas han de ser la plasticidad y el endurecimiento que sobreviene cuando se realiza la cocción. De hecho, lo que vulgarmente se denomina arcilla es un conjunto heterogéneo de minerales de arcilla propiamente dichos y un variopinto grupo de otros minerales, entre los que destaca el cuarzo.

El histograma de la Figura 6.3 simboliza una media de la distribución de diferentes minerales que se presentan en las arcillas de interés cerámico. Las cantidades son porcentuales e indican el intervalo habitual de cada mineral (en el caso del cuarzo, del 15 al 30%, por ejemplo). En la citada figura se observa que los minerales de arcilla, en las arcillas de interés cerámico, raramente sobrepasan el 50%.

La mayoría de aplicaciones de la arcilla se encuentran en el campo de las cerámicas. La arcilla se trabaja fácilmente y luego se hornea para volverla resistente térmica y mecánicamente. Otra aplicación cerámica de la arcilla puede situarse en el campo de la construcción civil. Para cerámica estructural se utiliza arcilla común.

Para la fabricación de fibras para aislamientos, se utiliza caolín con pequeñas cantidades de sodio, circonio y boro. Esta mezcla se funde en un horno eléctrico y el líquido resultante de la fusión se sopla y carda, llegándose a producir un material esponjoso, blanco y ligero parecido al algodón.

Papel. El papel está formado por una red de fibras de celulosa entrelazadas. Las irregularidades superficiales se corrigen añadiendo cargas, que además sirven para modificar el gramaje. Las cargas están constituidas por caolín, talco, carbonato cálcico y resinas aglomerantes.

Cemento. Para la fabricación del clínquer, se utiliza piedra caliza y arcilla. El conjunto se calcina sobre

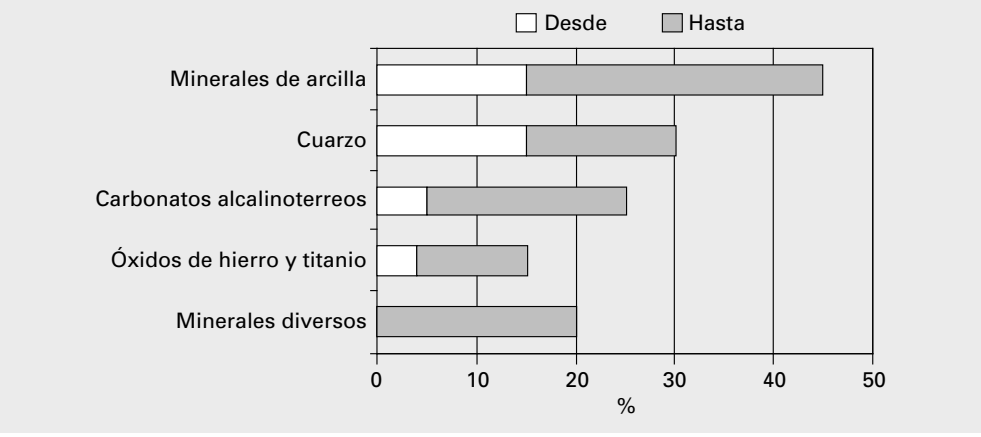


Figura 6.3. Distribución de minerales en arcillas rojas de interés cerámico.

los 1.300 ℃, se pulveriza y se le añade un poco de yeso y, con frecuencia, cenizas volantes (residuo procedente de las centrales termoeléctricas) esta mezcla recibe el nombre de cemento. Para la fabricación de los cementos blancos (aluminosos) se usan caolines.

Agregados ligeros. También llamados áridos expandidos. Cada día más utilizados en la construcción civil y se caracterizan por tener una estructura celular que proporciona baja densidad y capacidad de aislamiento térmico. La baja densidad se consigue a base de incorporar a la arcilla un producto orgánico que a alta temperatura formará gases y, por tanto, generará porosidad o bien utilizar arcillas ricas en hematites.

Caucho. Las arcillas caoliníticas y los caolines se utilizan como cargas para reforzar el caucho. Las características físicas y químicas de las cargas inorgánicas que les confiere el poder reforzante no están del todo claras, pero uno de los parámetros más influyentes es la superficie específica de la carga. Los caolines se dividen en duros y blandos; los primeros confieren al caucho vulcanizado mayor resistencia a la abrasión que los segundos, los caolines duros, como especificación granulométrica, deben poseer 80% de las partículas con diámetro menor a las 2 micras, en cuanto que los blandos, sólo el 56%.

Refractarios Para la fabricación de refractarios sílico-aluminosos y aluminosos se utilizan las arcillas caoliníticas de media («fire clay») o alta refractariedad como materia prima. Estas arcillas, plásticas o no, deben poseer refractariedades no inferiores a 1.500 ℃. Todas las arcillas caoliníticas usadas en la industria de refractarios deben tener un contenido en hierro y álcalis lo más bajo posible. Juntamente con el caolín, estas arcillas se utilizan para la fabricación de chamota por calcinación a temperaturas elevadas. Seguidamente, la chamota se añade a conglomerantes arcillosos adecuados que se utilizan en la industria de los refractarios.

Agricultura. El poder adsorbente de la arcilla desempeña un papel importante en la agricultura, ya que algunos minerales de arcilla adsorben rápidamente iones minerales libres que pueden ser fácilmente cambiados por otros iones de mayor valor para las plantas.

Otras aplicaciones. Se usan arcillas como ligantes de arenas para los moldes de fundiciones en la industria metalúrgica, en cargas para ciertos plásticos y en la fabricación de tintas, ya que ciertas arcillas presentan un gran poder de suspensión e impiden que los pigmentos sedimenten. En aplicaciones de filtraje (aceites, vinos, cerveza,...) y clarificación de agua. Como medio impermeabilizante para canales, embalses, muros, cubetas de vertederos de basuras, etc.

En los siguientes apartados se intenta describir la aplicación de las arcillas a la valorización de los residuos.

2. Contribuciones de la cerámica a la valorización de los residuos

De cara a la valorización de residuos, cuando se emplea la tecnología de la ceramización, es preciso conocer las evoluciones de los minerales de arcilla en función de la temperatura puesto que éstos son los protagonistas de las reacciones cerámicas.

Cada mineral de arcilla tiene unas temperaturas de transformación que vienen determinadas por el grado de perfección de los cristales. Existe un sinfín de parámetros que pueden alterar estos valores como la naturaleza de los minerales presentes que acompañan al mineral estudiado, la atmósfera del horno, la velocidad de calentamiento, la naturaleza de los residuos incorporados, etc. Sin embargo en el presente apartado se procura hacer abstracción de estos factores y centrar el análisis en el rango de temperaturas teóricas de transformación de los minerales de arcillas más comunes:

- *Caolinitas.* Tienen una elevada temperatura de fusión. Durante la cocción forman muy poco vidrio y por ello requieren una temperatura de cocción muy elevada (> 1.200 ℃) para la sinterización de la mullita. La caolinita desordenada («*fire-clay*») forma mullita a menor temperatura. Durante la síntesis de mullita, si hay iones de hierro presente, suelen fijarse en el retículo cristalino. En estas circunstancias el típico color blanco de la arcilla caolinítica cocida se torna amarillo.
- *Illitas.* Debido a la proporción de álcalis presentes, sobre todo K_2O, el punto de fusión oscila de 1.050 a 1.150 ℃. Cerca de este rango de temperaturas, estos minerales desarrollan una importante fase líquida que da lugar a la formación de fases estables. Como la mayoría

de las illitas contiene hierro, a partir de los 900 ℃ se engendra un típico color rojo, a no ser que haya presencia de cal.

- *Montmorillonitas.* Es un grupo de minerales con composiciones químicas bien diferenciadas y ello da lugar a un desarrollo de fases en cocción diferentes. Con frecuencia contiene hierro en el retículo que es liberado a partir de los 800 ℃ y ocasionan el típico color rojo. Las temperaturas límites se hallan alrededor de los 1.050 ℃. En presencia de cal forma unas fases muy resistentes.
- *Cloritas.* Tiene composiciones químicas muy variables. Pero todas ellas contienen hierro en el retículo que es liberado en forma de hematites sobre los 550 ℃. A partir de 800 ℃ genera fase líquida y la cocción se puede prolongar hasta los 1.050 ℃.
- *Micas (moscovita y sericita).* Forman una abundante fase líquida alrededor de los 950 ℃, sin embargo el rango de ceramización es corto. Cuando la arcilla es muy rica en mica el problema se acentúa y se recomienda añadir cal o caolinita.

El histograma de la Figura 6.4 da una indicación de las temperaturas en las que se evidencian los fenómenos más representativos de la cocción cerámica. En primer lugar ocurre la destrucción del retículo cristalino con la pérdida del agua de constitución. Los valores que figuran en el dibujo son promedios (por ejemplo, es muy difícil establecer los valores exactos en el caso de las illitas). A mayor temperatura, alrededor de los 1.000 ℃, y a partir de la fase liquida se forma la mullita y otros minerales de recristalización. El líquido, a medida que se enfría el material, va aumentando de viscosidad, hasta formar una fase sólida y dura que aglutina los demás componentes y proporciona la resistencia característica de los cerámicos.

Una vez elegida la arcilla para llevar a cabo el proceso de valorización, en cierta manera queda fijado el proceso, que en términos cerámicos puede ser una cerámización convencional o una gresificación. Las arcillas cuando llegan a su temperatura de maduración desarrollan una cantidad determinada de líquido que resulta ser fundamental para el proceso de inertización. La cantidad y calidad de la fase amorfa es la que determina el éxito de la inserción del contaminante en la matriz cerámica.

Según la combinación de arcillas disponibles y de la naturaleza del residuo, en términos de compatibilidad cerámica, el material terminado tendrá una cantidad de fase amorfa como la indicada en la Figura 6.5.

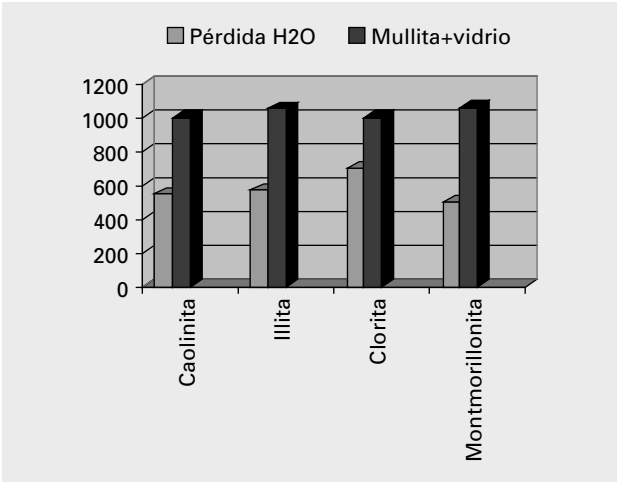


Figura 6.4. Temperaturas de transformación de los minerales de arcilla.

La posición de la especie cerámica sobre la flecha de la figura simboliza la cantidad de fase amorfa en porcentaje. Así, una cerámica especial, o un vitrocerámico, son casi enteramente cristalinos (0% de fase amorfa), mientras que un vidrio es completamente amorfo (100% de fase amorfa). Las dos clases que se estudiaran, por ser las de mayor aplicación en el campo de la valorización de residuos, son: la cerámica convencional que contiene sobre un 50% de fase amorfa y los productos gresificados, cuya fase amorfa se acerca al 80%.

El DVD adjunto, en el punto 2, se muestra información relacionada con la fabricación de material cerámico.

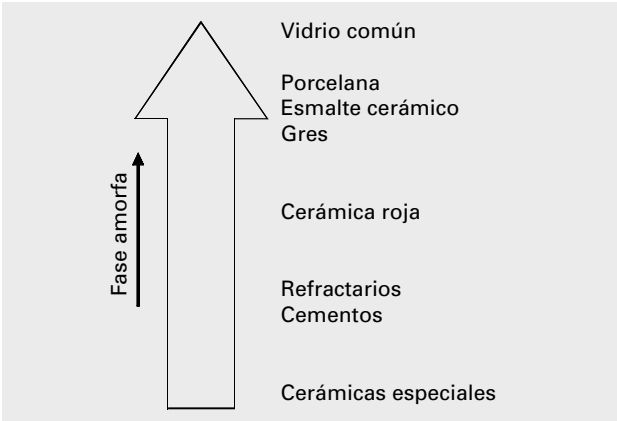


Figura 6.5. Cantidad de fase amorfa según el material cerámico.

2.1. DETERMINACIÓN DE LA POROSIDAD EN LA MATRIZ CERÁMICA

En los cuerpos cerámicos existe una correlación entre la cantidad de fase amorfa y la porosidad interna, ya sea cerrada o abierta. La determinación de la porosidad abierta proporciona una gran información sobre la especie de cerámica fabricada. Así, una cerámica convencional estructural tiene una porosidad abierta que varia del 8 al 20%, mientras que para una pasta gresificada este valor siempre es inferior al 3%.

La esencia de la cocción cerámica consiste en la paulatina reducción de la porosidad de la pasta a medida que aumenta la temperatura. Esta densificación se consigue a base de la generación de una fase líquida que procede de los fundentes. Por tanto, se deberá estudiar la correlación existente entre los fundentes y la aparición e intensidad de la fase líquida.

El ceramista mide la porosidad abierta como la absorción de agua. Durante la cocción, en la medida que los poros se llenan de fase líquida, la absorción de agua se reducirá. Simultáneamente la disminución de la porosidad comporta una reducción del volumen total de la pieza, característica que el ceramista denomina contracción o retracción en cocido.

Ahora bien, en determinadas pastas cerámicas la disminución de la porosidad no es el objetivo fundamental, sino el mantenimiento de la contracción, lo que garantiza la estabilidad dimensional. Por ello es conveniente estudiar la relación de estas variables haciendo la distinción entre las pastas porosas y las gresificables.

2.1.1. Noción de absorción de agua y contracción

La absorción de agua (A) se define como la cantidad de agua que puede retener una probeta después de estar inmersa en agua 24 horas (la normativa fija la temperatura del agua y la forma exacta de realizar el ensayo). Sí P_s es el peso de la probeta en seco y P_h el de la misma probeta una vez ha absorbido el agua, la absorción será:

$$A(\%) = \frac{P_h - P_s}{P_s}$$

La contracción (C), o retracción, lineal se define como la disminución de longitud que experimenta la probeta durante la cocción. Sí L_i es la longitud de la probeta antes de entrar al horno y L_f es la longitud a la salida, la contracción será:

$$C(\%) = \frac{L_i - L_f}{L_i}$$

2.1.2. Trazado de la curva de absorción en función de la temperatura

Para trazar la curva de absorción de agua, u otra característica, en función de la temperatura se toma un conjunto de probetas idénticas, en la que se ha incorporado una determinada cantidad de residuo. Deben fabricarse tantas probetas como puntos se quieran estudiar. Cada una de ellas se cuece hasta la temperatura deseada y una vez fría, se mide el parámetro deseado.

Lo normal es tomar los valores cada 50 ℃ (en intervalos de 100 ℃ arriba y debajo de la temperatura supuesta como de ceramización). Sin embargo, cuando se pretende ahondar en alguna característica particular, se puede trazar la curva cada, 15 o 20 ℃.

Con estos ensayos se determina una curva como la representada en la Figura 6.6. La primera información importante que se derivará de la construcción de las curvas es determinar la temperatura de cocción aconsejable. La contracción, es un indicativo de los cambios de tamaño de las piezas. La conjunción de ambas curvas suele dar suficiente información al ceramista para establecer los parámetros de funcionamiento del horno.

La gráfica precedente no señala la temperatura a la cual se inicia la formación de la fase amorfa, que suele acontecer, en este tipo de pastas illiticas, sobre los 600-700 ℃, pero si indica la temperatura máxima de cocción. Así, en el caso mostrado sería del orden de los 980 ℃, es decir aquella temperatura en la que la contracción comienza a ser importante.

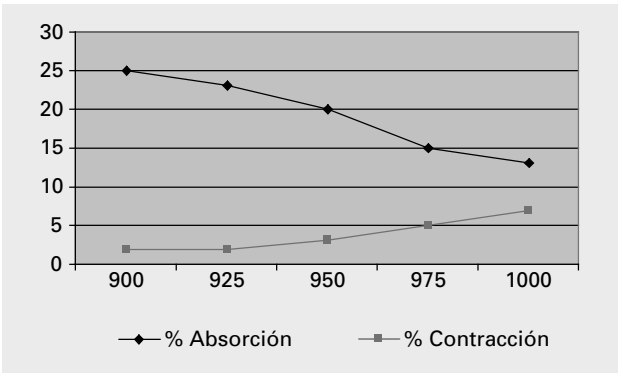


Figura 6.6. Curva de absorción/contracción de una cerámica de pasta no carbonatada.

Desde el punto de vista de la posible lixiviación, obsérvese que la porosidad abierta es del 13%, o sea un valor notable para que permita la penetración del agua al interior de la masa cerámica. Por ello, como precaución adicional, la porosidad total del cuerpo cerámico deberá ser tan reducida como más tóxico sea el contaminante presente en el residuo que se pretenda inertizar.

2.1.3. Noción de gresificación

Cuando se trata de inertizar un residuo tóxico y peligroso usando la tecnología cerámica hay que tomar ciertas precauciones ya que al tratarse de un producto inorgánico la masa del residuo permanecerá inalterable. El proceso cerámico, si se lleva a cabo de manera correcta, modifica la cristalografía y confina los metales pesados en la estructura vítrea, o bien altera las estructuras cristalinas para convertir el producto tóxico en un compuesto inocuo.

Con tales premisas es obvio que el proceso cerámico pretende crear una estructura tal que imposibilite al máximo la absorción de agua por parte de la red capilar cerámica. Precisamente, cuando una cerámica presenta una capacidad de absorción de agua inferior al 3% se denomina gres. Desde el punto de vista cerámico tales materiales se caracterizan por tener una fase vítrea mayoritaria. De ahí el interés por la gresificación de residuos tóxicos en masas gresificables.

Una vez mezclado el residuo con la arcilla, conformado y secado se cuece a diferentes temperaturas, como muestra el gráfico de la Figura 6.7. A medida que la temperatura de cocción es mayor la absorción de agua es menor. Ello se debe a que la fase vítrea que se forma con la temperatura se va introduciendo en los poros abiertos de la masa cerámica taponándolos. Paralelamente el tamaño de los poros se reduce, favoreciéndose con ello la hidrofobia.

Una temperatura superior es garantía de una fase líquida más abundante y más agresiva, capaz por tanto de atacar el residuo e integrarlo en la masa de manera que haga, prácticamente, imposible la lixiviación.

Otro aspecto importante es la granulometría del residuo que pretende tratarse. Así si en tamaño del grano es grueso, la fase amorfa actuará de la misma manera pero el proceso será una encapsulación puesto que los granos de mayor tamaño no se integrarán en la matriz cerámica y quedarán, simplemente, recubiertos de fase amorfa.

2.2. RESIDUOS DE LA INDUSTRIA DEL VIDRIO Y DE LA CERÁMICA

La industria cerámica ha demostrado tener una gran potencialidad para la absorción de una enorme cantidad de residuos. Su práctica ha venido siendo habitual en países donde las cerámicas estaban ubicadas en áreas limítrofes a las grandes zonas mineras. Es bien sabido que en la mayoría de los países industrializados la actividad minera constituye la primera fuente de generación de residuos. Si estos tienen algún valor residual es obvio que se hayan hecho esfuerzos para su reutilización.

El caso más antiguo es el aprovechamiento de los estériles de pizarras y esquistos bituminosos. Su composición es netamente arcillosa (de hecho en

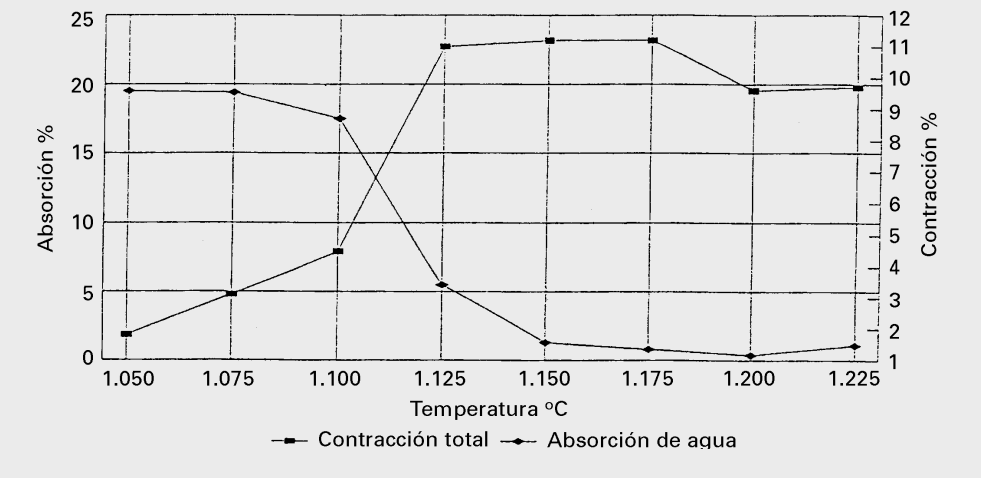


Figura 6.7. Curva de gresificación de un pavimento fabricado con residuos.

muchos países anglosajones existe una fuerte tradición de fabricar ladrillos con estos minerales) y de paso se aprovecha el poder calorífico residual procedentes de la oxidación de los hidrocarburos.

Con los estériles de carbón pasa algo parecido a lo de las pizarras pero su alto tenor en sustancia carbonosa impone límites a su utilización como materia prima para la tecnología cerámica. La Figura 6.8 corresponde a la fotografía de un cuerpo cerámico donde, para su fabricación se ha usado una gran cantidad de arenas de fundición.

Figura 6.8. Cuerpo cerámico fabricado con residuos de arena de fundición.

El cuarzo, principal componente de la arena de fundición, es un mineral muy refractario, es decir no se integra en la matriz cerámica (entra en forma cristalina y sale de la misma manera), no obstante se emplea para dar porosidad abierta y permitir el paso del perneado, ya que la cerámica así fabricada se emplea para filtros.

Las cenizas volantes son residuos de las centrales termoeléctricas que queman carbón. La naturaleza de las cenizas volantes es muy variada, ya que depende de la clase de combustible utilizado, sin embargo se distinguen por tener una fase vítrea mayoritaria y una cierta cantidad de inquemados lo que les proporciona un valor calorífico adicional. Su uso en cerámica está bien extendido y no presenta, si la arcilla es adecuada, problemas especiales.

En el caso de residuos de naturaleza básicamente orgánica, como los fangos procedentes de la industria papelera, textil, depuración biológica de aguas residuales o bien residuos de plástico, cada vez hay más ejemplos de valorización y su metodología, por tratarse de residuos mayoritariamente orgánicos, ya ha sido descrita en el capítulo anterior.

El DVD adjunto, en el punto 2, se muestra información complementaria sobre residuos industriales que han sido usados para fabricar diversos materiales usando la tecnología cerámica.

2.2.1. Residuos de la industria cerámica

Desde el punto de vista funcional, la industria cerámica está formada a su vez por diversos subsectores que vale la pena enumerar para entender la posibilidad de valoración de sus residuos (materiales fabricados).

- Cerámica estructural o roja, también denominada tierra cocida (ladrillos, tejas, etc.). Se trata de materiales parcialmente rotos o con defectos importantes y, por tanto, no vendibles. El elemento diferencial es la capacidad de absorción de agua (siempre superior al 5%) que dificulta su adición como áridos para la formulación de hormigones, en particular en hormigones estructurales, ya que los destinados a elementos decorativos se prestan bien a la incorporación de estos áridos (de hecho no existen criterios de aceptación o recepción para estos subproductos). Sin embargo se emplean como materiales drenantes con gran éxito. Desde el punto de vista cuantitativo pueden llegar a ser cantidades importantes (en el año 2004, solo en Cataluña, este tipo de residuos superó las 200.00 t).
- Cerámica de pavimento y revestimiento. El valor de la absorción de agua es, casi siempre, inferior al 3%, lo que abre otras puertas a la valorización (uso en formulación de hormigones).
- Cerámica sanitaria. Una parte de ella, la porcelana, es semejante a lo indicado en el apartado precedente, mientras que el denominado gres sanitario es más poroso. No obstante se trata de materiales extremadamente duros.

En cualquier caso hay que dejar bien claro que, desde el punto de vista químico, son siempre materiales inertes (no lixivian) y en este sentido deben hallar fáciles vías de valorización.

La caracterización de los residuos procedentes de la industria cerámica depende tanto de las materias primas usadas como de la tecnología de fabricación empleada. Siguiendo la terminología utilizada en la industria cerámica, la clasificación genérica de los residuos puede establecerse de acuerdo con tres categorías:

- Residuos crudos.
- Residuos cocidos.
- Residuos de proceso de corrección de emisiones en el sector cerámico.

Residuos crudos: Son todos aquellos que se generan en las etapas previas a la cocción. La caracterización de estos residuos es la misma que las materias primas.

En líneas generales su grado de afección al medio corre paralelo a la naturaleza de la materia prima y a su grado de elaboración. Así el polvo producido en la preparación de la pasta es peor que la propia pasta. Los restos de esmalte serán peores si se trata de esmaltes crudos que de esmaltes fritados. Pese a todo, la gran mayoría de estos residuos aceptan un alto grado de reciclabilidad interna por lo que es extraño que se evacuen de la factoría en calidad de residuos.

Los residuos más conflictivos son los procedentes de la depuración de las aguas de lavado de las cadenas de esmaltado. Estos residuos están constituidos por restos de esmaltes de composición química similar a un esmalte. Considerando una media de 1 kg. de esmalte seco por m^2 de pavimento y evaluando unas pérdidas de un 11% se comprende que la cantidad es importante. Con ciertas restricciones se puede incorporar a la pasta. La Figura 6.9 muestra el esquema para la recogida de los efluentes reciclables.

Reutilización de lodos de depuración de aguas (EDAR) en la pasta atomizada. Se han hecho pruebas industriales y se ha demostrado que no hay ningún problema en incorporar hasta un 1% en peso de lodos secos en pastas de gres rojo atomizadas. La fracción fina del propio atomizador también se incorpora a la barbotina. Las bajas de azulejos antes de cocción, sean esmaltados o no, se añaden a la pasta de atomizado sin problemas.

Las aguas depuradas se reciclan. Se añaden al agua de los molinos de preparación de barbotinas. Esta agua tiene boro y, por su procedencia floculantes. Por tanto, deberán adicionarse con mesura y teniendo en cuenta que precisarán una cantidad mayor de defloculante.

Residuos cocidos: Se trata de los materiales ya cocidos desechados por no pasar los controles de calidad o por simples roturas. Estos materiales son, en su inmensa mayoría, inertes y no presentan ningún problema para su valorización.

La propia naturaleza de material inerte lo convierte en un buen candidato para su uso en la propia cerámica, como desgrasante.

Un caso particular, que con el tiempo ha ido siendo cada vez más importante es el lodo procedente del pulido del gres porcelánico. Este material una vez cocido se trata con diversas muelas hasta lograr un pulido especular. La operación se lleva a cabo con muelas de CSi y aglomerante magnésico. El resultado es un lodo finísimo que contiene los componentes

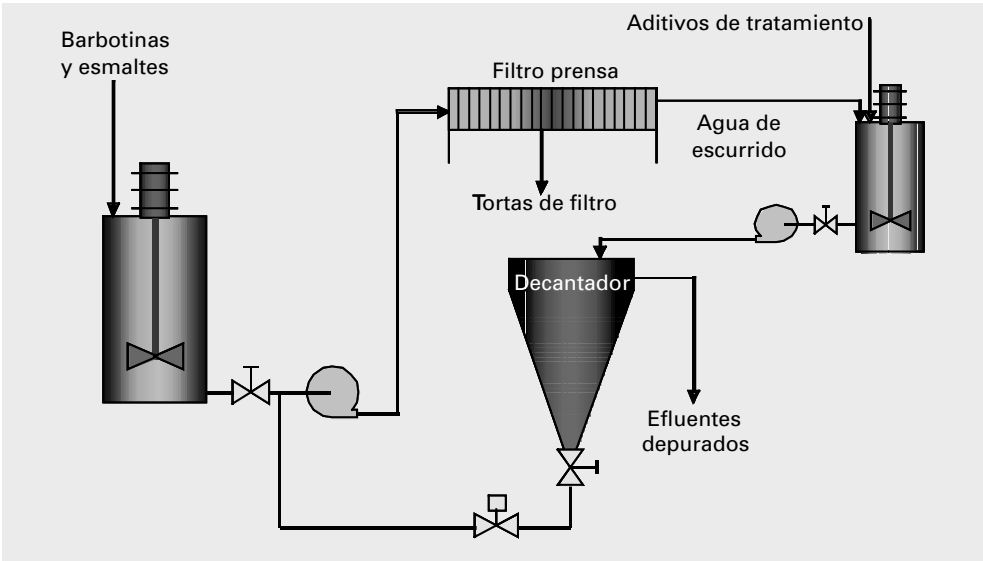


Figura 6.9. Tratamiento de residuos líquidos en la industria cerámica.

de la muela (en un 25%) más los del porcelanato: cuarzo, mullita y mayoritariamente fases amorfas.

Estos lodos pueden añadirse en grandes proporciones (hasta el 30%) a las pastas de ladrilleria, siempre y cuando conociendo la tipología de los minerales de arcilla que componen dicha pasta. En este caso las características mecánicas del material fabricado suelen ser superiores a los ladrillos producidos sin lodo, por el hecho de que, al margen de la absoluta compatibilidad de las materias usadas, la gran fase amorfa presente en el lodo residual, provoca reacciones de ceramización más prematuras lo que equivale a una mejora del material, y además se puede reducir algunos grados la temperatura de cocción con un notable ahorro energético.

Residuos de la depuración de gases: La legislación española vigente sobre la emisión de gases en hornos cerámicos (Decreto 833/75) es bastante laxa y permite que los gases de chimenea no deban someterse a tratamiento de lavado alguno. Sin embargo la aplicación de la normativa europea más restrictiva (derivada de la IPPC) obligará a su depuración. En cualquier caso tanto estos residuos, como los procedentes del lavado de gases de las líneas de preparación de pasta, son perfectamente reciclables en la propia pasta.

2.2.1.1. Residuos peligrosos en el sector del pavimento

El sector de los pavimentos y revestimientos se cita en particular puesto que España es una potencia en el sector, abrumadoramente concentrado en Castellón (Comunidad Valenciana) ya que en el 2003 produjo 624 millones de m^2, solo por detrás de la China con 1.950 millones de m^2, pero por delante de Italia. El sector de la fabricación de pavimentos y revestimientos (azulejos), junto con el de la fabricación de sanitarios y, en mucha menor medida, la cerámica de mesa y decorativa, constituyen industrias generadoras de residuos peligrosos, debido principalmente al empleo de esmaltes o técnicas serigráficas. Así, según fuentes del INE, la Comunidad Valenciana generó, en 2003, 0,27 millones de toneladas de residuos peligrosos, es decir el 12,5% de España.

Los denominados lodos cerámicos incluyen, básicamente arcillas, pero también restos de esmaltes crudos, tintas serigráficas, etc. Sólo en el año 2003 se declararon en este sector 4,8 millones de toneladas, que de momento la autoridad ambiental considera que no son peligrosos, pero que es de suponer que en un futuro se verá obligada a considerar un cambio de criterio ya que según el Catálogo CER, la mayoría de ellos contiene, en mayor o menor cantidad, los siguientes productos:

- 08 0202: lodos acuosos que contienen materiales peligrosos.
- 08 0314: lodos de tinta que contienen sustancias peligrosas.
- 15 0202: Absorbentes, materiales de filtración, trapos de limpieza impregnados.
- 19 0106: Residuos líquidos acuosos del tratamiento de los gases.
- 06 0404: Residuos que contienen mercurio (pruebas de laboratorio de control de densidad).
- 08 0317: Residuos de tóner de impresión que contienen sustancias peligrosas.
- 16 0106: Residuos con ácidos o bases o con metales pesados.

Sin embargo, como antes se ha explicado, la propia industria cerámica puede hacer un esfuerzo para poder valorizar internamente la inmensa mayoría de estos residuos, con independencia de su peligrosidad.

2.2.1.2. Empleo de residuos cocidos como materia prima para fabricar clínquer

El material cerámico cocido que, por motivos de control de calidad no haya pasado los controles de calidad o estén rotos (comúnmente denominados cascotes) al margen de poder ser valorizados internamente tienen otra aplicación muy interesante como materia prima para la elaboración de clínquer de cemento Portland.

Como es conocido, para la fabricación del clínquer se emplea arcilla cruda. Los cascotes de cerámica son arcilla cocida. Desde el punto de vista químico conservan idénticas las propiedades (elementos químicos) pero, desde la óptica energética hay que tener en cuenta unas propiedades fundamentales:

La cerámica cocida tiene una composición mineralógica, según la naturaleza del producto fabricado (ladrillo común, azulejo, gres porcelánico, etc.), mayoritariamente amorfa, es decir que se trata de una sustancia muy reaccionable y, por tanto interaccionará con los otros componentes (caliza) con mayor rapidez y efectividad que la arcilla cruda. Usando terminología propia de la industria del cemento se podría decir que estos residuos tienen propiedades puzolánicas, en especial si los cascotes son de procedencia calcárea.

Con esta propiedad es posible, en teoría, reducir la temperatura de trabajo (de clínquerización).

Si se emplea cascote procedente de la fabricación de azulejo o de muchos ladrillos donde el contenido en óxido de cal es importante, la ventaja será mayor (puesto que podrá sustituir una mayor cantidad de caliza). En los cascotes de naturaleza calcárea, se encuentran fases minerales propias del clínquer como la wollastonita o la gelenita. El Fe_2O_3 omnipresente en los cascotes de la cerámica de construcción, no representa problema alguno para la fabricación del clínquer.

Con la entrada en vigor del *Protocolo de Kioto*, la industria cementera es una de las que se verá afectada en mayor cuantía y el empleo de materias primas (residuos) menos demandantes de energía le favorecerá especialmente.

Si bien ya se ha comentado que la inserción del cascote en la masa cerámica no representa problema técnico alguno (por las mismas razones antes aludidas), muchas industrias no lo hacen porque les supone la compra de un molino para la trituración del cascote. Sólo en el sector del pavimento y revestimiento se calcula que se generan más de 50.000 t/año.

Como curiosidad, hay que señalar que en un estudio llevado a cabo por el Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento (perteneciente al CSIC) determinó las concentraciones de isótopos radiactivos en los cascotes empleados a base de emplear la técnica isotópica Gamma (de la firma Ortec). Efectivamente se detectó la presencia de radioisótopos Ra^{226}, T^{232} y K^{40}, este último muy frecuente en las arcillas del centro de Cataluña. En los tres radioisótopos citados el estudio detectó un índice de radioactividad definido por la UE (*RO112 Radiological protection principles concerning the natural radioactivity on building materials*) muy bajo. Según este documento, cualquier material con un índice inferior a seis se puede considerar como no radioactivo, como obviamente es el caso estudiado.

2.2.2. Residuos de la industria del vidrio

El reciclaje del vidrio, envases, puede considerarse una industria en si misma que, como cualquier otra exige sus requerimientos. Así, por lo general, para la aceptación de diversos tipos de vidrio se precisa:

- Una pureza del 99% en el caso del vidrio transparente.
- Una pureza del 90% para los vidrios de color marrón y verde.

Se entiende que para el reciclaje del vidrio recuperado para volver a fabricar envases, o bien se disponen de sofisticados sistemas de selección de colores o bien se tiene que recurrir a otros métodos de valorización como los que se comentarán seguidamente.

La industria de la fabricación de objetos vidrio es una de las pocas que no produce residuo de los propios materiales de la fabricación. Toda merma o pieza defectuosa que se genera se tritura y se incorpora de nuevo al horno de fusión. El apartado pues va destinado a determinadas aplicaciones del residuo de vidrio que se produce fuera de las factorías, como pueden ser envases, vidrios ventana, espejos. Todos estos materiales tienen un reciclaje relativamente fácil.

2.2.2.1. Mobiliario urbano

El banco de la fotografía de la Figura 6.10 tiene la base fabricada con vidrio recuperado. Sin embargo, para este tipo de aplicaciones los diseñadores exigen con frecuencia una calidad determinada de acabado en cuanto a color, circunstancia que complica la labor.

No obstante, el principal obstáculo no es técnico sino económico. El mobiliario urbano acostumbra a ser caro y normalmente no tiene otro destinatario que los ayuntamientos y estos suelen tener otras prioridades.

2.2.2.2. Glasfalto

Término que proviene de la contracción de las palabras inglesas de vidrio y asfalto. O sea la fabricación de asfalto usando vidrio triturado y mezclado con piedra caliza como árido para la construcción de firmes de carretera. En el Reino Unido se trata de una práctica muy extendida.

Cuando por determinadas razones, falta de separación de colores, gran distancia a transportar el vidrio recuperado, se llega a la conclusión de que no vale la pena volver el residuo a la planta de vidrio, esta puede ser una solución práctica.

2.2.2.3. Microesferas de vidrio

Se trata de unas microesferas de vidrio que se añaden a las pinturas de señalización horizontal, por ejemplo en carreteras, para aumentar el poder reflectante por la noche.

Figura 6.10. Mobiliario urbano a partir de vidrio recuperado.

Para su fabricación se parte de vidrio transparente normalmente plano. Se tritura y se echa en un horno. En el interior de éste existe una corriente vertical ascendente de gases calientes. Cuando encuentran a la partícula de vidrio la arrastran para arriba. En la trayectoria la elevada temperatura va redondeando los cantos de los granos de vidrio y transformándolos en esferas. Después de pasar por un enfriador la corriente de gases se dirige a un filtro de mangas donde se recupera la microesfera de vidrio.

Hay que tener presente que un vidrio suele definirse como un «líquido subenfriado de viscosidad infinita». Es decir, a temperatura ambiente tienen apariencia de sólido proporcionada por su rigidez mecánica derivada del extraordinario aumento de viscosidad de la masa fundida, pero no debe considerarse como tal, ya que aunque desde el punto de vista mecánico los vidrios se comporten como sólidos, puesto que poseen una estructura amorfa y, por tanto, carecen de la estructura cristalina que caracteriza y define al estado sólido. De este modo, el esquema de la Figura 6.11 muestra el principio de valorización del vidrio residual en forma de esfera reflectante.

En el proceso lógicamente se producen esferas de diverso tamaño que deben someterse a una separación granolumétrica. Las esferas de mayor tamaño se destinan a otras aplicaciones, como lechos filtrantes.

2.2.2.4. Mosaico de vidrio

El denominado mosaico son losetas de vidrio recuperado. Es decir se trata de una operación de reciclaje a partir de cien por cien de residuos. El proceso de fabricación se inicia con la recepción del vidrio recuperado, habitualmente vidrio ventana de diversos espesores. El material ha de estar libre de contaminantes orgánicos.

La primera acción consiste en una trituración primaria, seguida de una secundaria. En la primera es fundamental que no se produzca polvo, por ello no es aconsejable el empleo de molinos de martillos. La segunda trituración se lleva a cabo en un molino de bolas donde, después de un tamizado, debe rechazarse (se recicla) el material con tamaño superior a 500 micras.

A continuación el polvo entra en una humectadora y seguidamente a una prensa para conformar el ta-

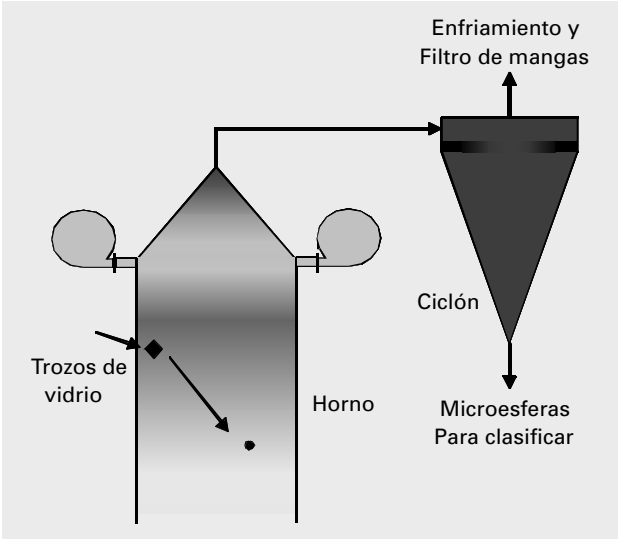


Figura 6.11. Principio de funcionamiento de la fabricación de microesferas de vidrio.

maño del material (lo habitual es 25x25 mm con un espesor alrededor de 4 mm). Sin solución de continuidad se introduce en un horno de sinterización.

El horno, por lo general, es de banda metálica puesto que la máxima temperatura no debe sobrepasar los 850 °C. Desde el punto de vista técnico, el principio de funcionamiento no difiere mucho del anterior (microesferas). El material entrante es ya vidrio y, por tanto, no tiene punto de fusión. Con la elevación de la temperatura se persigue una sinterización superficial de las partículas de vidrio gracias a la reducción de la viscosidad lograda por el incremento de la temperatura. Si ésta no es uniforme a lo ancho del horno, unas losetas quedan menores que otras (las que han soportado mayores temperaturas se han compactado más y, por tanto, han contraído más: quedan más pequeñas).

Como que se trata de un producto decorativo, el acabado superficial puede conseguirse por dos procedimientos:

- Aplicar un esmalte cerámico, color, a la salida de la prensa. El esmalte funde a medida que la temperatura se eleva y queda perfectamente adherido a la superficie.
- Coloración en masa, a base de introducir un pigmento o colorante cerámico en el polvo de vidrio que va a prensarse. Ésta es una vía ideal para la introducción de todo el material defectuoso.

El DVD adjunto, en el punto 3, se muestra información complementaria sobre los mosaicos de vidrio

2.2.2.5. Vidrio celular

Se trata de otro procedimiento de aprovechar el vidrio, en este caso no importa que este sucio o contaminado de residuos orgánicos (volviendo al caso anterior, una contaminación de madera, papel o plástico al alcanzar determinada temperatura comienza a emitir gases. Simultáneamente el vidrio, a medida que aumenta la temperatura, se va «soldando» y al disminuir la viscosidad consigue una matriz vítrea continua que impide la salida de gases, con lo que al gas la hincha y deforma).

Para ello se toma polvo de vidrio, puede estar contaminado, y se mezcla con un residuo orgánico, de manera que cuando el conjunto, una vez prensado, penetre en el horno la materia orgánica se vaya gasificando. La salida de gas equivale a pérdida de masa y, al final de la cocción buena parte del gas queda atrapado en el seno del vidrio, formado grandes cavidades. La curva de temperatura en el horno es muy crítica y fundamental para lograr los objetivos. El material fabricado, como muestra la Figura 6.12 es muy liviano.

El material fabricado aúna dos características bien singulares. Es aislante térmico ya que contiene infinidad de poros cerrados. Es impermeable ya que es vidrio. Estas propiedades lo hace un material ideal para la construcción de tejados y aplicaciones al exterior.

Figura 6.12. Vidrio celular.

2.3. INERTIZACIÓN DE ESCORIAS DE INCINERADORAS DE RSU

Las escorias generadas en la incineración de RSU (residuos sólidos urbanos) son materiales muy heterogéneos, en particular las que proceden de hornos equipados con solera de parrilla fija se caracterizan por tener una carga orgánica considerable. A la vez, la escoria contiene ciertos metales pesados e incluso compuestos tóxicos que se han podido sintetizar en las zonas de baja temperatura próximas a la parrilla donde se realiza la combustión. Todo ello hace que estas escorias tengan carácter especial y deban manipularse con precaución. Desde el punto de vista físico, la escoria puede contener hasta un 20% en peso de materiales de tamaño importante (más de 10 cm).

Su composición está integrada, mayoritariamente, por materias no combustibles presentes en los RSU como metales, vidrio, huesos, cerámicas, tierras y las propias cenizas de los materiales que han combustionado (en las modernas incineradoras este porcentaje no suele exceder del 2%). Los productos citados anteriormente, junto con los inquemados, son los que le confieren el carácter especial a estos residuos. Con demasiada frecuencia también aparecen restos de plásticos y algún papel.

Toda la problemática antes expuesta se debe a que la mayor parte de los residuos, en particular los RSU son tratados en masa, esto es, son incinerados sin:

- Clasificación previa, con lo que las oscilaciones del PCI son muy importantes.
- Trituración previa, con lo que el tamaño de los componentes es notable y las condiciones de combustión empeoran notablemente.

Este procedimiento es, sin duda, el más extendido y empleado para la conversión energética de los combustibles alternativos o residuales. La incineración sobre parrilla consiste en someter los residuos a una combustión de tipo adiabático en el seno de un lecho colocado sobre una parrilla y ello, con frecuencia trae como resultado que la escoria contenga contaminantes no deseados.

Para la valorización directa de las escorias, éstas se desferrizan por medios magnéticos; en general debe mejorarse la calidad de la chatarra obtenida limpiándola por medio de una criba vibrante o bien por trituración y cribado. Es usual instalar una prensa de chatarra para preparar balas, lo que ahorra espacio de almacenamiento y gastos de transporte.

En las modernas incineradoras dotadas de instalaciones de limpieza de gases no hay peligro de mezcla de los residuos secundarios generan:

- Las escorias se evacuan por la parte final de la parrilla o del horno rotatorio.
- Las cenizas volantes pueden proceder de la limpieza de la caldera, que se recogen en la parte inferior de la propia caldera y las cenizas volantes procedentes del filtro de mangas o del electrofiltro.

La escoria es alcalina, con un pH entre 10 y 12,5. Los elementos mayoritarios son Si, Fe, Ca, Al, Mg, Na y K todos ellos en forma de diferentes óxidos que, en total superan el 75% en términos de masa. La Tabla 6.5 reproduce el contenido de diversas especies químicas de las escorias de la incineradora de RSU de Son Sant Joan (Mallorca, España), sobre muestra seca.

Tabla 6.5. Componentes de una escoria de incineración de RSU

Especie	mg/kg	Especie	mg/kg
Cloruros	253	Hg	2,6
Sulfatos	10.727	K	10.830
SiO_2	4.500.000	Mg	13.225
Al	28.520	Mn	275
As	13	Na	85.780
Ca	1.239.550	Ni	183
Cd	2,5	Pb	2.700
Cr	875	Sn	960
Cu	542	Zn	585
Fe	26.900		

En este apartado se pretende describir otra forma de valorización de las escorias diferente a la valorización a granel convencional. Como indica el diagrama ternario de la Figura 6.13 la situación de las escorias es próxima a la de las arcillas por lo que su ceramización no ha de presentar problemas especiales (hay que mencionar que la escoria que aparece en el diagrama es genérica, o sea que incluye también escorias metalúrgicas).

Desde el punto de vista de proceso de valorización el problema más grave reside en la elevada humedad de la escoria como consecuencia del agua que se le añade a la salida del horno para enfriarlas (el residuo, para su incorporación a una masa cerámica se debe triturar y la elevada humedad invalida ciertos sistemas de molturación), así cómo la presencia de numerosos trozos de metal.

En numerosos ensayos a escala industrial, dirigidos por este autor, se ha demostrado que la ceramización de escorias de RSU es un beneficio para el medio ambiente en varias direcciones:

- Se ahorra materia prima, arcilla, puesto que una cantidad de la misma es sustituida por el residuo. Por descontado también se reduce el impacto ambiental que provocan las extracciones de arcilla a cielo abierto. La cantidad a añadir es, básicamente, una función de la naturaleza de los minerales de arcilla presentes en la propia arcilla.
- Se valoriza el residuo, evitando que la escoria sea enviada a un depósito controlado.

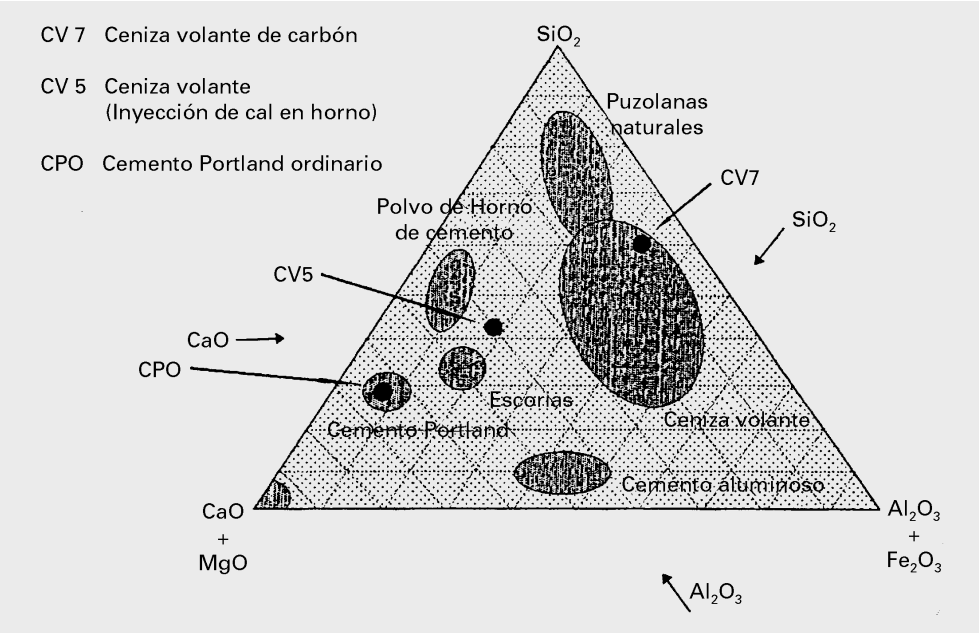


Figura 6.13. Diagrama ternario con situación de diversos residuos.

- Se mejora, de manera importante, la calidad de las emisiones en los hornos cerámicos. Ello se explica por el hecho de que las escorias poseen componentes vitrificados (cascote de vidrio) y otros compuestos semejantes y compatibles con las materias primas cerámicas (huesos). Al contener la mezcla un elemento de naturaleza vítrea, se inicia la formación de fase amorfa a menor temperatura. De este modo muchos de los contaminantes que serían normalmente emitidos, ya sea total o parcialmente, son atrapados en la incipiente fase líquida que hace las veces de sumidero.

De acuerdo con los ensayos llevados a cabo por este autor, durante la valorización de las escorias en un horno túnel cerámico, capaz para una producción de 120 t/día de material cocido, los análisis de gases en la chimenea arrojaron resultados sorprendentes. Así la emisión de material particulado fue cinco veces inferior y la de metales pesados diez veces menor que en condiciones estándar de funcionamiento.

Otra de las aplicaciones que en los últimos años se está trabajando en profundidad es el uso de las escorias de incineración de los RSU como materia prima para fabricación del clínquer. Las escorias, a diferencia de las cenizas volantes de incineración, tienen una estructura esencialmente amorfa lo que equivale, en el caso de la fabricación del clínquer, a:

- Usar una materia prima abundante y barata.
- Una materia prima amorfa. Es decir, que es capaz de avanzar las reacciones de clínquerización lo que se traduce en un ahorro energético considerable.
- Como se trata de una materia generada a elevada temperatura no emite CO_2 cuando se vuelve a calentar, lo que es muy favorable de cara al problema de la emisión de gases de efecto invernadero en la industria cementera.

2.4. TRATAMIENTO DE RESIDUOS DE HUESOS

Los residuos fosfáticos son importantes, tanto los de origen mineral como los de animal, en particular los procedentes de los mataderos. Si bien hay que añadir que los primeros contienen, con frecuencia, contaminantes más dañinos como el uranio. Todos estos materiales proceden del apatito, roca fosfórica (P, Ca, Ca) que se diferencian entre sí por la presencia de F, Cl o grupos hidroxilo dando lugar a una larga serie isomorfa.

Los huesos están constituidos por fosfato cálcico y de la acumulación de restos de animales han derivado grandes masas de fosforita. El fosfato cálcico se trata con ácido sulfúrico para convertirlo en superfosfato (fertilizante) y hacerlo así hacerlo más soluble en los ácidos débiles que existen en los suelos. De esta operación se genera precisamente uno de los residuos más habituales: el fosfoyeso.

La fosforita (roca fosfática) y el hueso calcinado responde a la siguiente fórmula química: $3\ CaO \cdot P_2O_5$, que corresponde al orto fosfato de calcio. La

llamada porcelana de huesos (*bone china*) ya fabricada hace miles de años durante las antiguas dinastías chinas, tiene una composición, aproximada del 20% al 40% de cuarzo, 30% a 50% de feldespatos (ahí es donde puede incorporarse, hasta el 50% en forma de hueso calcinado) y 20% a 40% de arcilla. El hueso calcinado también se ha usado en la formulación de esmaltes cerámicos como opacificante.

En los últimos tiempos se han desarrollado muchos estudios para comprobar la efectividad del hidroxiapatito: $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ (material sintetizado a partir del apatito que tienen grandes aplicaciones en la biomedicina) para el filtraje de aguas contaminadas gracias a la capacidad de intercambio de los iones Ca^{2+} por metales pesados mono y divalentes. Para ello se sintetiza el material a 1.350 °C, lo que proporciona una porosidad adecuada para facilitar una superficie de intercambio importante. La Tabla 6.6, muestra el análisis químico del hidroxiapatito y del hueso calcinado.

Tabla 6.6. Análisis químico del hidroxiapatito y hueso calcinado

Óxido	Hidroxiapatito	Hueso calcinado
SiO_2	0,25	< 0,2
TiO_2		< 0,01
Al_2O_3	< 0,01	< 0,2
Fe_2O_3	< 0,01	0,03
CaO	54,4	54,8
MgO	0,95	1,12
Na_2O	0,75	0,95
K_2O	0,02	0,01
P_2O_5	40,9	41,0
BaO		0,03
SrO		0,09

La tabla pone de manifiesto la gran semejanza entre ambos materiales, es decir, que hay la posibilidad de construir los tipos de filtro antes citados a partir de los huesos calcinados. Los ensayos realizados a nivel de laboratorio han puesto de manifiestos que las capacidades de intercambio son muy parecidas.

Por otra parte el óxido fosfórico tiene capacidad de formar vidrios. De hecho uno de los objetivos de la introducción de huesos calcinados en la formulación de la porcelana de huesos es la fusión a menor temperatura (por esto sustituye al tradicional feldespato, con el consiguiente ahorro de materias primas y energía).

El DVD adjunto, en el punto 4, se muestra información relacionada con la porecelana de huesos y ladrillos fabricados con residuos de huesos.

2.4.1. Cementos de fosfato

Los cementos fosfáticos, usados ya en la antigüedad (con otras materias primas), están hechos a base de fosfato tricálcico, fosfato monocálcico monohidratado y agua. Desde el punto de vista medioambiental es importante saber que estos materiales son biocompatibles y biodegradables. Por esto hallan una gran aplicación en la fabricación de prótesis e implantes.

2.5. RESIDUOS DE LA INCINERACIÓN DE RSU Y DE FANGOS DE EDAR

Los residuos resultantes de la incineración de RSU son dos:

- Escorias (ya descritas en el apartado 2.3), que se recogen en la parrilla del horno y en la literatura especializada también se denominan cenizas de fondo «*bottom ash*».
- Cenizas volantes, que se recogen en la caldera y filtro de mangas «*fly ash*» que por su particularidad en el tratamiento se describen en el capítulo siguiente y en el dedicado a los RSU.

Temática diferente constituyen las cenizas procedentes de la incineración de fangos de EDAR, vía de gestión al alza en toda la UE. Los fangos de EDAR se incineran (y también gasifican) en reactores de le-

Tabla 6.7. Caracterización de la fracción inorgánica de un fango de EDAR

Óxido	%
Na_2O	2,3%
K_2O	0,6%
CaO	26,6%
MgO	2,7%
Al_2O_3	4,2%
Cr_2O_3	2,6%
Fe_2O_3	25,7%
SiO_2	18,1%
P_2O_5	10,8%
Óxidos diversos	6,3%
TOTAL	100,0%

cho fluidizado. En el capítulo destinado a fangos de EDAR se exponen extensamente tablas de caracterización pero, a grandes trazos la ceniza de un fango de EDAR constituye, aproximadamente el 30-40% de la masa de fango seco. Es decir, su conversión energética va a dejar un residuo inorgánico importante por lo que es preciso estudiar vías de valorización.

Desde el punto de vista estrictamente cerámico (esto es, para realizar una valorización cerámica) el análisis mostrado en la tabla no presenta grandes dificultades pero la realidad es distinta. Los gases, antes de su salida al exterior deben neutralizarse (los fangos suelen contener S, N y algo de Cl) además al añadirse carbón activo, material orgánico, para adsorber los metales y restos de hidrocarburos, el análisis final dista bastante del expuesto en la tabla anterior. Por ello es preciso someter a este residuo complejo a operaciones de inertización.

La inertización es la operación destinada a la reducción, o contención, de la carga tóxica de residuos, estando considerada un escalón por encima de la estabilización. Estos términos son relativos, y tratándose de los compuestos resultantes de la conversión energética de fangos de EDAR conviene definir las diversas técnicas, ordenadas según la facilidad de lixiviación:

- *Tratamientos fisicoquímicos*. Consiste en la adición de lechada de cal y cemento Portland a un residuo rico en contaminantes. Los metales suelen quedar inmovilizados a valores básicos de pH. Si la cantidad de metales pesados es importante, como suele acontecer en el caso de los fangos de EDAR, hay que elegir bien el pH más efectivo para la solidificación del metal pesado mayoritario. Para acabar de complicar el panorama, los metales se hallan adsorbidos en la red microcapilar del carbón activo por lo que la lechada de cal o el cemento tienen difícil acceso.
- *Ceramización*. Es la mezcla de un residuo con arcilla. En función del tipo de matriz cerámica y del tamaño de partícula se puede hablar de una encapsulación o del confinamiento del óxido en la red del silicato amorfo (verdadera ceramización). Hay determinados metales, u óxidos, mas refractarios que otros, por ejemplo el Cr_2O_3 y hay que elegir un tipo de arcilla tal que forme fase líquida en un amplio margen de temperaturas para evitar que ciertos óxidos se escapen (como fácilmente puede acontecer con el ZnO) o no se integren como los refractarios. En el Reino Unido se han hecho pruebas de aglomerar el fango de EDAR con dextrina y cocerlo luego a 1.000 ℃
- *Vitrificación*. Esta tecnología consiste en la inserción de metales en la matriz atómica de un silicato complejo. Para liberarlo es preciso romper un enlace molecular.

Cuando un residuo contiene una mezcla de compuestos orgánicos e inorgánicos, como los fangos de EDAR, puede plantearse empezar a considerar los tratamientos a partir del nivel de ceramización. En principio, el tratamiento fisicoquímico tiene como finalidad solidificar el residuo para ser depositado en un vertedero controlado.

2.5.1. Cenizas de tratamiento térmico de otros residuos

Cuando se realiza el tratamiento térmico, básicamente de incineración, de una infinidad de residuos, a pesar de que algunos de ellos no tienen esta calificación, como los indicados en la tabla siguiente, se liberan una serie de elementos potencialmente peligrosos. Es obvio, como muestra la Tabla 6.8, que la presencia de algunos contaminantes es muy importante.

Tabla 6.8. Principales contaminantes en cenizas de diversos residuos (mg/kg)

Residuo	Cl	Cd	Hg	Sb	As	Pb	Cr	Cu	Mn	Ni	Sn	Zn
ASR	20.000	30	0,9	80	9	900	200	10.000	400	150	3.000	4.000
Fango EDAR	1.000	5	1,1		0,2	100	100	500		70		1.000
Plásticos	10.000	40	1	50	0,8	300	50	90	20	10	25	600
Carbón	2.000	0,5	0,7	3	9	60	20	30	80	30	5	90
Cárnicos	3.000	0,4	0,3	4	0,9	1	3	9	20	0,9	4	200

Los residuos especificados en la tabla precedente, están expresados en mg/kg de residuo) y se refieren a valores estándares, son los siguientes:

- *ASR* (Residuo de la fragmentación de vehículos). Debido a la gran cantidad de metales presentes en este tipo de residuo, es normal que también sea la ceniza que presente mayor cantidad de metales en la ceniza resultante.
- *Fangos de EDAR*. Se trata de un valor medio de los diversos tipos de fangos y de tratamientos.
- *Plásticos*. Se trata de residuos mezclados, la cantidad de PVC presente explica la cantidad de Cl tan elevada.
- *Carbón*. Los carbones, como todos los minerales y materias primas, contienen una gran cantidad de contaminantes.
- *Carnes y residuos con huesos*. Por la cantidad de metales no es un residuo especialmente conflictivo desde el punto de vista de la conversión energética.

Como comentario y a título de epílogo debería decirse que en el caso de la incineración, la ley obliga a hacer un tratamiento de gases. En cambio en la incineración del carbón (una central termoeléctrica de carbón, técnicamente es igual a otra de RSU) no es obligatorio el tratamiento de gases, con el agravante de que las cantidades de gases producidas en una termoeléctrica son infinitamente mayores.

2.5.2. Resultados de la ceramización de diversos residuos

La Figura 6.14, muestra la tendencia en la variación de la densidad aparente de una cerámica roja cuando se le añaden cantidades crecientes de residuos industriales.

Hay que hacer la observación preliminar que la arcilla usada para llevar a cabo estos ensayos era calcárea, con cerca de un 10% en cal, y este óxido muy refractario suele mantener una porosidad interna importante, lo que se traduce en una densidad de partida relativamente baja, 1.700 kg/m^3 y que no cambia significativamente cuando se añaden residuos hasta un 20%, excepto en el caso de las cenizas volantes de las centrales termoeléctricas que consumen carbón.

La interpretación de los resultados es el siguiente. Al añadir compuestos que tienen una densidad semejante o mayor que la arcilla, la densidad del ladrillo aumenta, básicamente porque al tratarse de un material fino se introduce en los espacios vacíos y compacta mejor el conjunto.

Por otra parte hay que valorar las siguientes particularidades. Los polvos de acería son un residuo complicado. Si se usa un tipo de arcilla calcárea inevitablemente habrá emisiones de óxidos a la atmósfera. Los mas adecuados para ceramizar son la escoria de RSU, ya que contiene mucho vidrio y provocará una ceramización a menor temperatura que se traducirá en una capacidad de absorción de agua menor, algo semejante pero potenciado se produce con los lodos de pulido de pavimentos cerámicos (la absorción de agua desciende del 16% al 10%). Cosa muy diferente acontece con la adición de cenizas volantes de carbón, en particular si estas no están bien quemadas. El resultado es que los hidrocarburos presentes en la ceniza se volatilizan, la densidad desciende y la absorción de agua aumenta hasta un 40% (de hecho con este residuo se fabrica un material ligero).

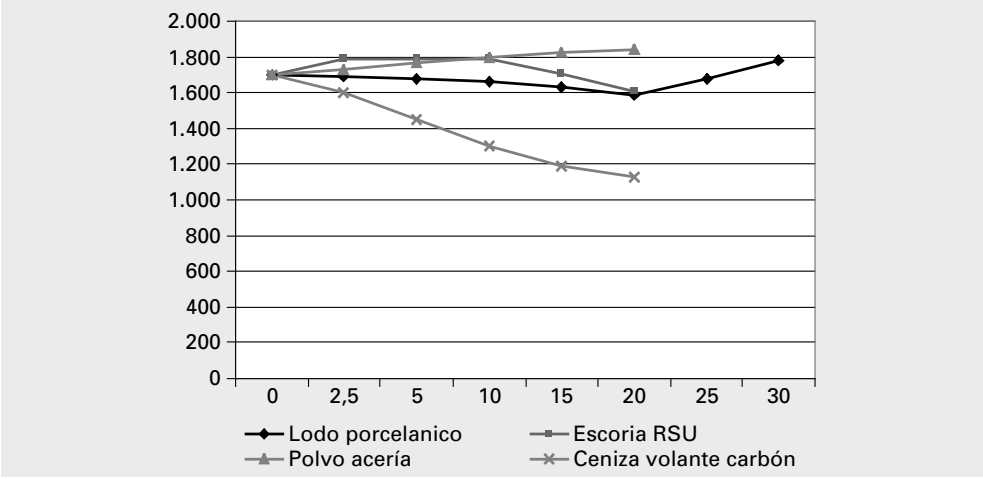


Figura 6.14. Variaciones de la densidad de una cerámica con la aportación de residuos.

2.5.3. Residuos de carbonato cálcico

Se trata de un polvo residual muy abundante en la industria del manipulado del mármol o de la piedra caliza. Se recoge en forma de polvo, en el filtro de mangas o en forma de lodo cuando se usa agua para cortar bloques.

Muchísimas arcillas de interés cerámico contienen carbonato cálcico en su composición, por tanto se trata de un residuo bien próximo a las materias primas cerámicas. No obstante, uno de los componentes de las pastas cerámicas que en mayor grado influyen sobre el comportamiento de éstas durante el proceso de fabricación son los carbonatos. Su existencia cambia el curso de las reacciones que tienen lugar a altas temperaturas produciendo fases cristalinas que no se formarían en su ausencia. Este hecho se debe a una descomposición de la calcita en óxido de calcio y anhídrido carbónico, reaccionando posteriormente el primero con la sílice y la alúmina procedentes de la descomposición de los minerales de arcilla presentes.

El elevado porcentaje de fases cristalinas (cuarzo residual y cristales de minerales ricos en cal) así como la escasa formación de fase amorfa durante la cocción, confieren a las piezas obtenidas a partir de pastas calcáreas una porosidad elevada, así como un intervalo de cocción amplio. Ello contribuye a disminuir la expansión por humedad. En consecuencia la utilización de carbonatos o arcillas calcáreas es un mineral deseado para la fabricación de revestimientos porosos y está justificada para regular la porosidad y proporcionar un intervalo de cocción amplio. Sin embargo cuando se rebasa la temperatura normal de trabajo, la formación de fase vítrea es muy abundante y la estructura cerámica se derrumba de repente. Por estos mismos motivos, la presencia de minerales calcáreos están contraindicados en pastas destinadas a productos gresificados.

El fabricante de artículos de cerámica, a partir de arcilla naturales comunes con cierta presencia de carbonato cálcico, sabe que en determinadas épocas del año, en particular después de periodos copiosos de lluvias, los ladrillos presentan los típicos cráteres con un polvo blanco en su interior, defecto comúnmente denominado «caliche». El fenómeno, o defecto, suele presentarse muchas veces al cabo de meses que ha sido expedido de la fábrica y, sobretodo, durante las etapas calurosas con independencia de que el material haya sido colocado o se halle todavía en el almacén. Así pues, es evidente la correlación existente entre arcilla con nódulos de carbonato cálcico, calor ambiental y defectos.

Se denomina caliche a un grano de carbonato cálcico de cierto tamaño. Si estos nódulos son muy grandes, al descomponerse la calcita y liberar el CO_2, queda la cal viva (CaO) que es muy higroscópica, y la tendencia es absorber agua para transformarse en cal apagada o portlandita. Según las condiciones en que tenga lugar esta reacción, puede ocasionar la destrucción del ladrillo.

La reacción de hidratación de la cal es altamente exotérmica y el calor generado provoca dilataciones locales que si no se dispone de una fuente de disipación de calor, pueden ocasionar explosiones y desconchamientos debidas a bruscas dilataciones térmicas. Por tanto, cuando hay certeza de la presencia de caliche, debe realizarse un proceso termorregulador para que el ladrillo no se desintegre (inmersión en agua fría). Los descascarillados originados por las explosiones suelen tener un tamaño cuatro veces mayor que el grano de caliche original.

2.5.4. Las cenizas de incineración de fangos de EDAR como materia prima para el hormigón

Numerosos estudiosos han investigado el efecto de la adición de cenizas procedentes de la incineración de fangos de EDAR como aditivo para la fabricación de hormigones y su efecto sobre el comportamiento del futuro hormigón a la corrosión de las armaduras. El resultado mayoritario indica que, a efectos del ataque a las armaduras no es aconsejable añadir más de un 10%.

El comportamiento de las cenizas volantes de incineración es complejo, no hay que olvidar que las cenizas es un término que engloba las cenizas volantes propiamente dichas, los aditivos usados para la neutralización de los gases ácidos, el carbón activo añadido, el exceso de reactivos presente, etc. Por ello el peligro de corrosión es muy importante debido a la gran presencia de cloruros y sulfatos. En una ceniza estándar una suspensión de 1 g de ceniza en 100 g de agua desionizada, provoca una conductividad eléctrica de 9,6 mS/cm, un pH de 10,5 y un contenido de sales solubles en la fracción acuosa de 45 mg/g de ceniza, de ahí el peligro de la corrosión.

En conclusión, la actividad puzolánica de las cenizas en morteros de cementos Portland es moderada y debido a la gran presencia de sales solubles no es muy recomendable su empleo como aditivo a los morteros y hormigones. En todo caso se podrían usar para aplicación de hormigón en masa.

3. La industria del alumnio

El ciclo del aluminio, metal cada día más relevante, se realiza en plantas de aluminio primario, en las fundiciones, en las instalaciones de transformación, en las de acabado y, naturalmente, en las de reciclado. Cada una de estas etapas presenta un impacto ambiental de mayor o menor calado.

La industria del aluminio, de primera fusión, comienza por la extracción de la bauxita, que es el mineral del que se obtiene la alúmina y de ella, el aluminio. Se trata de un proceso complejo y en muchas de sus etapas altamente contaminantes. Pese a ser uno de los procesos industriales que más afectan al medio, puesto que además de los lodos rojos se generan una gran cantidad de residuos, no se ha desarrollado un proceso alternativo.

3.1. LA BAUXITA Y EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DEL ALUMINIO

La materia prima para la producción de aluminio, la bauxita, está compuesta principalmente por uno o más minerales. Son una mezcla de hidróxidos de aluminio: gibbsita $Al(OH)_3$, boehmita Al(OH) y diáspora $HAlO_2$ donde cualquiera de ellos puede ser la especie dominante. Además suele haber también sílice, óxido de hierro y óxido de titanio como principales impurezas.

3.1.1. El proceso Bayer

La bauxita tiene que ser convertida en óxido de aluminio puro (alúmina) antes de que pueda ser transformada en aluminio por medio de la electrólisis, a través del proceso químico Bayer en las refinerías de alúmina. El óxido de aluminio es separado de las otras sustancias de la bauxita mediante una solución de soda cáustica, la mezcla obtenida es filtrada para remover todas las partículas insolubles. Seguidamente, el hidróxido de aluminio es precipitado de la solución de soda, lavado y secado, mientras que la solución de soda es reciclada.

Después de la calcinación, el producto final, óxido de aluminio (Al_2O_3), es un fino polvo blanco. La Figura 6.15 esquematiza el proceso Bayer.

De la alúmina al aluminio metal es preciso llevar a cabo una electrólisis donde se consume una ingente cantidad de electricidad (no es casualidad que las plantas de aluminio se sitúen en zonas donde la producción hidroeléctrica sea abundante).

En términos generales (según la mezcla de minerales en el depósito de bauxita), cuatro toneladas de bauxita son requeridas para generar dos toneladas de alúmina, las cuales producirán una tonelada de aluminio en una reductora. Es decir, se trata de un proceso altamente productor de residuos, de mayor o menor peligrosidad. Uno de los más importantes son los lodos rojos.

3.1.2. Los lodos rojos

Durante el método Bayer se segregan dos fracciones muy importante, y próximas entre sí: las arenas (que tienen su origen en el cuarzo presente en el mineral de bauxita y en aquellas partes del mineral que no han podido ser disueltas) y, después de su lavado, los lodos rojos.

La producción de lodos rojos es tan importante que, con frecuencia, se organizan congresos internacionales para debatir dicho problema. El análisis químico de los lodos rojos muestra que presentan una composición próxima a las arcillas, si bien las cantidades de óxidos de hierro y aluminio son muy altas, ello indica que se trata de una sustancia refractaria. En términos de aplicación de la tecnología cerámica a la inertización de estos residuos, la presencia de una sustancia refractaria suele ser un problema. Los materiales refractarios contienen poca fase amorfa y esto conlleva que, a la temperatura de trabajo, se genere poco líquido capaz de integrar a los residuos.

El lodo rojo es un residuo semisólido, de color rojo herrumbre brillante generado durante el proceso de clarificación, que contiene, por término medio: 19% SiO_2; 40,1% Fe_2O_3; 3,2% TiO_2; 21,4% Al_2O_3; 3,8% CaO; 3,0% Na_2O; y 9,0% otros. El lodo fresco contiene aproximadamente 60% de agua y un pH alrededor o superior a 12.

Los lodos son almacenados, en las cercanías de las plantas, tal y como indica la Figura 6.16.

El DVD adjunto, en el punto 5, muestra diversas fotos del almacenamiento de los lodos rojos correspondientes al complejo industrial Bauxilum en Guayana (Venezuela) e información complementaria del proceso Bayer.

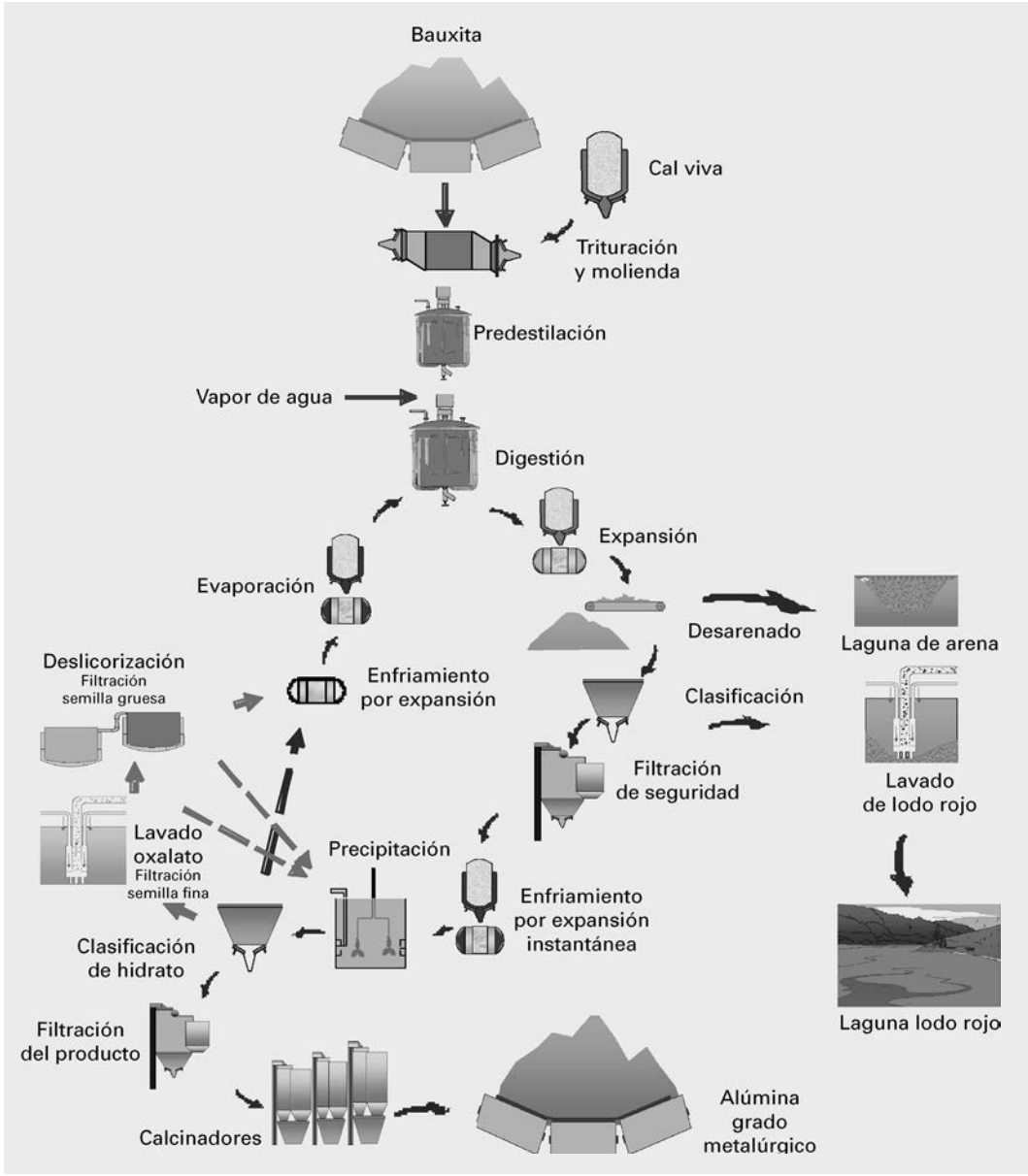


Figura 6.15. El proceso Bayer para la obtención de alúmina.

3.1.3. Valorizaciones del lodo rojo

Debido a la gran cantidad de lodo que se genera y al peligro que representa su almacenamiento, es preciso buscar soluciones para su valorización. El aluminio en medio alcalino, como se encuentra confinado en las balsas de lodos, forma compuestos insolubles estables. No obstante existen numerosas filtraciones donde el lodo pasa al medio. El contacto con la propia lluvia, siempre de carácter ácido, el aluminio comienza a disolverse al formarse la especie iónica Al^{3+} y una vez en disolución, incluso a bajas concentraciones (0,1-1 mg/l) es muy tóxico para la flora y la fauna acuática.

Para cualquier tipo de valorización, el lodo debe:

- Tener un pH neutro. Ello es relativamente fácil en el mismo punto de origen.
- Estar relativamente seco. Dado el tamaño de estas industrias es factible encontrar una sinergia que permita aprovechar energía residual para obtener el calor preciso para la posterior valorización del lodo.

3.1.3.1. Valorización cerámica del lodo rojo

La caracterización del lodo rojo pone de manifiesto que se trata de una especie muy próxima a las arci-

Figura 6.16. Balsa de lodos rojos.

llas de interés cerámico. Por otra parte la cantidad de alúmina presente supone una mayor refractariedad que, en términos cerámicos. es sinónimo de mayor temperatura. En efecto, una arcilla vulgar se distingue de una refractaria en que su temperatura de proceso, o de ceramización, se sitúa algunos centenares de grados por encima.

Cuando el material a inertizar contiene, por ejemplo metales pesados u óxidos de metales pesados, estos pueden volatilizar parcialmente ya que a las temperaturas de volatilización la formación de líquido en el seno de la cerámica refractaria es, todavía, incipiente. Por esto, en el caso de valorización cerámica del lodo rojo se deberá elegir una arcilla de relativo baja temperatura de ceramización. Se han llevado a cabo numerosas pruebas industriales de fabricación de materiales a partir de lodos rojos, casi todos ellos con notable éxito, al menos desde la óptica estrictamente cerámica.

3.1.3.2. Valorización en cementeras del lodo rojo

La caracterización del lodo rojo denota la presencia de óxidos idénticos a los precisos para la formulación del clínquer, si bien en proporciones diferentes. El lodo rojo puede sustituir a buena parte de la arcilla en la composición de las materias primas para esta industria.

La ventaja es que, si bien la cantidad a usar no es la misma que en la industria cerámica, las cantidades de materias primas que se emplean en la industria del cemento son mucho mayores.

3.1.3.3. Valorización mixta del lodo rojo

Desde hace tiempo, en EE UU y Japón se desarrolló un sistema consistente en peletizar y cocer, hasta su ceramización, los lodos rojos a una temperatura superior a los 1.200 ℃, en función de su caracterización. Los pelets se emplean como sustitutos de los áridos naturales para la fabricación de hormigones.

Obviamente se puede lograr unas calidades diversas si además se emplean escorias de horno alto y cenizas volantes de centrales termoeléctricas.

3.1.4. Valorización de otros residuos de la industria de la fabricación de aluminio

Una vez obtenida la alúmina, la refinería de aluminio debe producir el aluminio bruto a partir de la electrólisis. Las celdas electrolíticas son consumidoras intensivas de energía pero, además generan grandes cantidades de residuos, los ánodos y cátodos cuando están agotados.

3.1.4.1. Los residuos de ánodos

Los ánodos de las celdas electrolíticas están constituidos por: 65% de coque de petróleo, 20% de cabos

y 15% de brea. El proceso de cocción de ánodos, se realiza en hornos de cocción en carencia de oxígeno. Debido a la temperatura alcanzada (superior a 1.200 ℃) hay emisión de volátiles de hidrocarburos provenientes de la brea de alquitrán, equivalentes entre 4 y 6% de la cantidad de ánodos procesados. Una proporción de esta brea aporta energía a la cocción, mientras que la otra parte es extraída de las secciones del horno en forma de gases y conducidos a la torre de enfriamiento de tipo contacto directo con agua, para disminuir su temperatura entre 60 a 80 ℃ y así permitir la separación de la brea de la corriente de gases en el electrofiltro de forma segura. Durante este proceso, parte de los gases se condensan y escurren hacia el fondo de la torre de enfriamiento, electrofiltro y chimenea, para luego ser recuperados.

Una vez cocido, el ánodo se envarilla (se le añaden las piezas metálicas para que sea conductor eléctrico). La vida del ánodo no es muy larga. Así que cuando queda inservible se trocea (cabo) y se recicla.

3.1.4.2. Los residuos de cátodos del lodo rojo

Los desechos catódicos contienen alrededor de 30% en peso de carbón, 30% de refractario y 40% de sales (fluoruros). Sólo alrededor de 0,2% en peso del desecho catódico son sales de cianuro, que se forman por la entrada de aire a través de las ventanillas del casco y la posterior reacción del nitrógeno con el carbón del revestimiento.

Se trata de un residuo más complicado que el ánodo, sin embargo su vida es más larga ya que puede alcanzar los cinco años. Se ha intentado la incorporación de esta fracción carbonosa en porcentajes de hasta el 3,0% para la fabricación de ánodos. Los resultados han concluido que es posible la utilización de los desechos catódicos carbonosos como agregado seco en la fabricación de ánodos.

3.2. LA OBTENCIÓN DEL ALUMINIO

El aluminio resultante de la celda electrolítica se introduce en un horno de fusión, realmente es el horno de obtención del aluminio (aluminio virgen). En él, como muestra la foto de la Figura 6.17 unos quemadores calientan el material hasta provocar su fusión (con pocas variantes se trata del mismo horno que se emplea para la obtención del aluminio de segunda fusión, o reciclado). En el proceso se producen unas escorias, que se aprecian en la parte delantera del horno.

Figura 6.17. Horno de obtención del aluminio.

El manejo de metal líquido en cualquier fundición da lugar inevitablemente a la presencia de escorias y espumas. Entre unas y otras pueden llegar a tener una cantidad de aluminio del 30-60%.

Las escorias pueden subdividirse en «blancas» si se forman a partir de la fusión del aluminio, como sería el caso de la primera fusión que contienen solo aluminio, Al_2O_3 y trazas de impurezas y escorias «negras» que se forman al añadir fundentes a las cargas de los hornos y contienen, además del metal y su óxido, cantidades variables de fundentes alcalinos.

3.3. VALORIZACIÓN DE ESCORIAS SALINAS DE ALUMINIO

Aparte del proceso convencional de fusión de aluminio hoy en día también se realiza la valorización de las escorias obtenidas en aquella operación. El reciclado de estos fundentes (segundo ciclo) son utilizados para la fusión del metal (primer ciclo). La alúmina, óxido de aluminio, que siempre acompaña al metal finalmente es recuperado (tercer ciclo).

El proceso integral de aprovechamiento de las escorias de aluminio queda reflejado en el esquema de la Figura 6.18.

El proceso de valorización arranca con un tratamiento mecánico de trituración, una etapa de separación de metales, la disolución acuosa de las sales, el filtrado del material inerte y la recristalización de las sales.

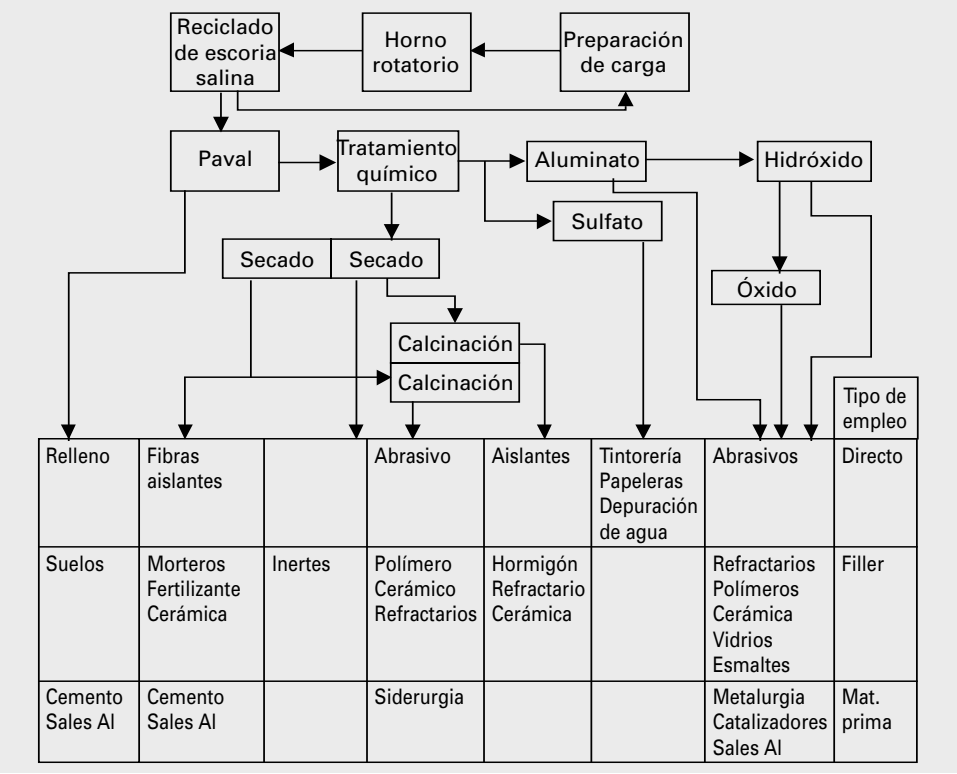


Figura 6.18. Proceso de reciclaje de PAVAL.

3.3.1. Caracterización de la escoria salina

Se trata de un polvo impalpable con un tamaño medio de 250 µm. El color es grisáceo debido al remanente de carbono. El punto de fusión es alto debido al tenor de alúmina. El análisis químico del PAVAL (escoria) es:

- 65-75% de Al_2O_3 hidratada, procedente de la oxidación y posterior hidratación.
- 5-8% de SiO_2 en forma de cuarzo y silicatos de aluminio.
- 6-12% de MgO en forma de sales y silicatos.
- 2-4% de CaO como sales y silicatos por las adiciones de fundente.
- 0,8-1,5% de Fe_2O_3 suele proceder de contaminación de la trituración.

3.3.2. Tratamiento de la escoria salina

Cuando el PAVAL es atacado por ácidos se solubilizan parte de sus componentes: Al y Fe, y Si si el medio agresor es alcalino. A partir del hidróxido de aluminio se inicia la recuperación.

Cuando se somete a tratamiento térmico, por encima de 950 ºC, se obtiene un material denso y duro que puede servir como carga abrasiva o como árido en la formulación de hormigones.

3.3.3. Aplicaciones del PAVAL

Obviamente la aplicación más destacada es su calidad de materia prima secundaria debido a su contenido en aluminio. Otra aplicación que valoriza parcialmente la escoria es la síntesis de sulfato de aluminio, reactivo que se usa en la depuración de aguas residuales. No obstante hay un sinfín de posibilidades de valorización entre las que cabe destacar:

- Como materia prima para la fabricación del clínquer. En este sentido se valora la aportación de alúmina.
- Aplicaciones como árido para hormigones asfálticos y de rellenos cuando las posibles lixiviaciones no constituyan riesgo.
- Como materia prima para la fabricación de cementos aluminosos. Para esta aplicación hay restricciones a la cantidad de SiO_2, MgO y ciertas sales.
- Como materia prima para la fabricación de otros tipos de cementos.
- Como carga para la industria cerámica, dado que la mayor parte de los componentes son compatibles con las materias primas cerámicas.
- Como materia prima para la fabricación de fibras minerales.

4. Valoración de residuos con alto contenido en asbestos

La tremolita y, sobre todo, la serpentina o asbesto blanco ($3MgO \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$) presenta una variedad fibrosa: el crisotilo que se emplea como material asbestiforme. Mineralógicamente son silicatos complejos de magnesio, hierro y calcio hidratados que permiten fibrarse. Sus fibras son sedosas, flexibles y resistentes de un diámetro de 0,01 mm y permite hilarse. El asbesto de anfíbol, crocidolita o asbesto azul ($Na_2O \cdot Fe_2O_3 \cdot 3FeO \cdot 8SiO_2 \cdot H_2O$) es la forma mas peligrosa del amianto.

Al tratarse de un material fibroso e ignífugo se ha utilizado para la producción de materiales resistentes al fuego y mezclado con cemento para la fabricación de materiales de construcción.

Hace mucho tiempo se descubrió que la exposición de los materiales con asbesto a la acción combinada del calor y el aire desprendía polvo (fibras) que producía la asbestosis, cuadro clínico que degenera en cáncer de pulmón. En esta tesitura el problema es doble: los materiales fabricados con asbesto son peligrosos pero, la demolición de una edificación que lo contenga todavía lo es más por cuanto origina una gran cantidad de polvo rico en asbesto. En España se construye mucho con hormigón pero la mayoría de países centroeuropeos usan la estructura de acero y la recubren con placas de asbesto.

El tamaño de las fibras de asbesto es del orden de 5 mm y el diámetro de 0,01 mm. Semejantes dimensiones no pueden ser retenidas por el sistema respiratorio y la fibra se incrusta directamente en el alveolo pulmonar provocando un edema (asbestosis) que con el tiempo degenerará en cáncer de pulmón. Es decir, el asbesto como cualquier material de estas características es peligroso por sus dimensiones físicas, no por su caracterización química.

En Francia el decreto 9/1/1997 obliga a depositarlo en un vertedero de clase I o vitrificar. No se permiten más de 500 fibras/m^3. En 1999 la Comisión Europea elaboró una Directiva sobre la restricción del uso del amianto que se traspondrá a todos los países de la UE.

Se han propuesto numerosos sistemas para la destrucción del amianto contenido en los edificios que deben ser derribados y/o reconstruidos. Uno de ellos, denominado ARCSOLV, se basa en la capacidad del ácido hidrofluorhídrico para la destrucción de los silicatos (asbestos). La reacción es muy rápida (en función del tipo de asbesto presente) y exotérmica y precisa ser refrigerada. El proceso consta de un reactor que puede instalarse en un contenedor móvil para poder desplazarse a pie de obra y llevar a cabo los siguientes pasos:

- Recogida del material deconstruido.
- Aspiración de los materiales que contienen asbesto.
- Descomposición y neutralización de los asbestos en el reactor.
- Confección de tortas de filtro prensa, que constituye el residuo del proceso.
- Disposición de los residuos, si bien se apunta la posibilidad de fabricar, una vez seca la torta de filtro prensa, un hormigón en masa.

4.1. POSIBILIDADES DE VALORIZACIÓN

Los residuos de asbesto, como silicato próximo mineralógicamente a los minerales de arcilla, será valorizable cerámicamente. El asbesto se descompone sobre los 800 ℃. Por tanto la ceramización es una buena tecnología para su tratamiento, siempre y cuando se sea muy escrupuloso en la etapa de la preparación de la pasta.

La Figura 6.19 muestra los resultados de gresificación de arcillas con elevados contenidos de residuos de asbesto. Hay que resaltar que la inertización de residuos peligrosos aconseja la gresificación. Así los ensayos con contenidos superiores al 40% de asbesto demuestran que es preciso alcanzar los 1.150 ℃ para gresificar la pasta cerámica.

El análisis térmico diferencial (DTA) de la Figura 6.20 muestra que la estructura cristalina del crisotilo comienza a perder agua de constitución a partir de 550 ℃ y el pico exotérmico a 810 ℃ denota que la estructura cristalina se desmorona a partir de esta temperatura.

El análisis termogravimétrico (TG), indica la temperatura a la que empieza a perder agua de cristalización, que supone un 9% del total. El agua de cristalización se pierde de manera irreversible, por tanto el material resultante entra en una fase metaestable y es todavía más reactivo en términos cerámicos. Es por ello que es preciso alcanzar mayores temperaturas para la consolidación.

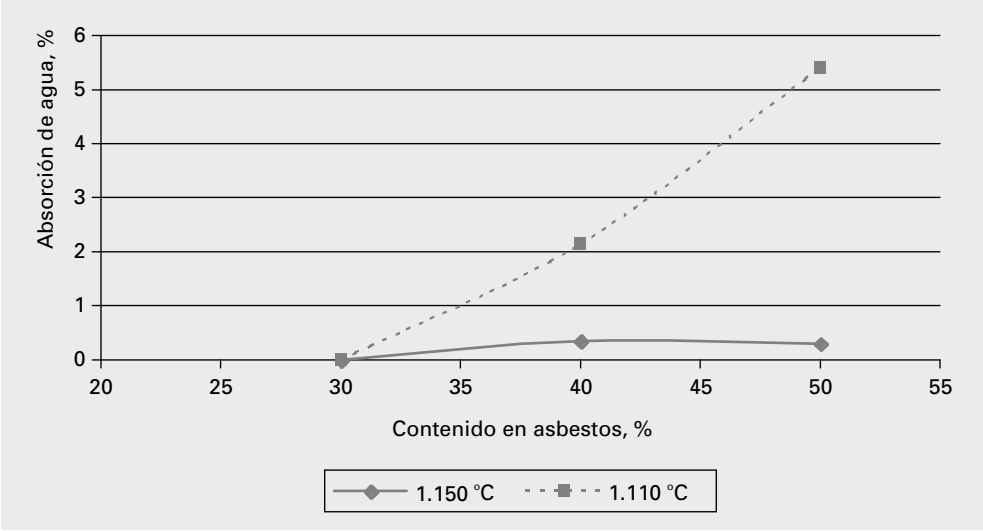


Figura 6.19. Curvas de gresificación de arcillas con asbestos.

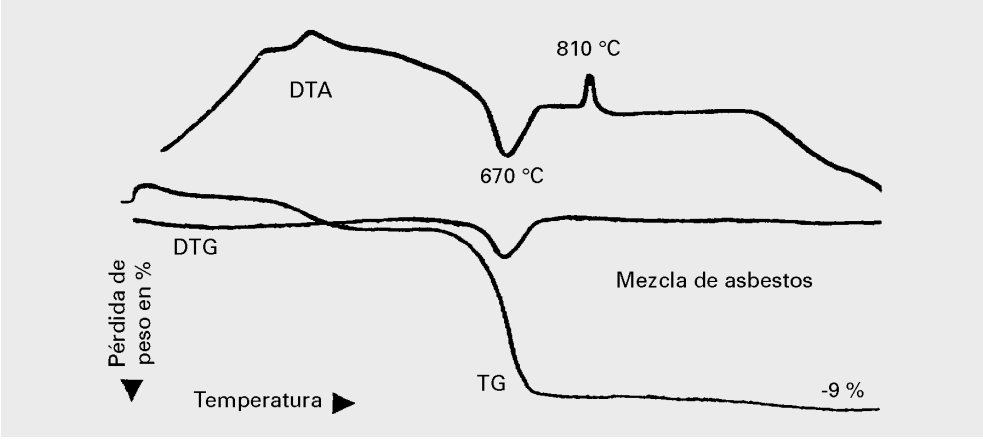


Figura 6.20. Termograma del crisotilo.

La ceramización es, por tanto, una solución para la inertización y posterior valorización de los residuos de asbesto. Mezclando arcillas comunes con residuos de asbesto se consigue un ladrillo de una interesante coloración marrón (esta coloración en la industria cerámica, se consigue añadiendo a la arcilla roja cantidades variables de dióxido de manganeso, mineral muy poco frecuente en España), como muestra la Figura 6.21.

La vitrificación es también una buena vía de valorización. Para ello es preciso mezclar el residuo de asbesto con otros residuos, escorias, y materias primas. La composición que muestra la Tabla 6.9 es adecuada para la vitrificación y posterior fibrado, operación que permite transformar el residuo en un material de construcción (fibra aislante) inocuo, por cuanto lo es el vidrio que lo forma.

La elección de uno o más residuos para conseguir la composición de un material que fibre a temperaturas asequibles, responde a la necesidad de formar una masa que funda y forme un vidrio poco viscoso. Ello es imprescindible técnicamente pero, desde el punto de vista económico la razón de recurrir a residuos está plenamente justificada.

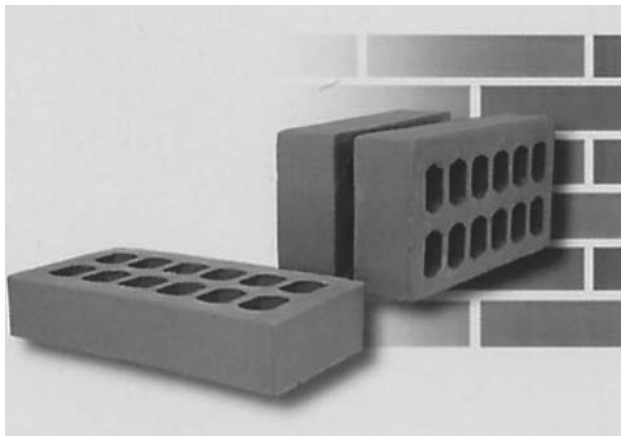


Figura 6.21. Coloración de un ladrillo con residuos de amianto.

Tabla 6.9. Composiciones vitrificables con residuos

	50%	20%	15%	15%	Mineral
Óxido	Residuo de asbesto	Arcilla	Escoria-1	Escoria-2	Fibra
SiO_2	50	55	41	17	44,70
Al_2O_3	7	39	10	2	13,10
CaO	3	1	32	45	13,25
MgO	32	1	10	5	18,45
Na_2O	1	1	3	—	1,15
Fe_2O_3	7	3	4	31	9,35

4.2. POSIBILIDADES DE FABRICACIÓN DE REFRACTARIOS CON ASBESTOS

En los países donde la presencia de asbestos es muy importante, en particular las minas de la provincia de Québec (Canadá) que explotan minas de serpentina que contienen una cantidad inferior al 10% en crisotilo (variedad de asbesto).

En la mina, el material obtenido esta compuesto de los siguientes minerales: serpentina como fracción mayoritaria, magnetita (Fe_3O_4) y brucita ($Mg(OH)_2$). La magnetita es fácilmente separable y la fracción resultante se calcina, para eliminar el riesgo de emisiones de asbesto. Al material calcinado se le añade pequeñas cantidades de magnesia y alúmina para producir forsterita (la forsterita pura tiene un punto de fusión superior a 1.900 ℃ y responde a la fórmula $2 \cdot MgO \cdot SiO_2$) en un horno, ya que es un tipo de refractario muy empleado.

Por otra parte la fracción rica en magnetita, con olivino, sirve para la fabricación de materiales de baja refractariedad pero gran capacidad de almacenamiento de calor. Una de las posibilidades exploradas aparece al final de este capítulo.

Ambos procesos se comentan ya que abren nuevas vías de valorización de residuos de asbesto, para la fabricación de materiales refractarios de alto valor añadido.

El DVD adjunto, en el punto 9, muestra diversas coloraciones de ladrillos comunes.

5. Inertización de lodos de la industria de acabados de superficies

Los lodos procedentes de las industrias de acabados de superficies: niquelados, cromados, zincados, etc. constituyen uno de los residuos potencialmente más contaminantes que genera la industria. El proceso de depuración de las aguas termina con la precipitación de los metales en forma de hidróxido. Los lodos suelen tener un porcentaje de humedad del 75% hecho que complica todavía más su posterior tratamiento.

La industria de tratamiento de superficies suele tener un perfil de industria pequeña y atomizada por el territorio, hecho que complica la recogida de los lodos. De hecho muchas de estas industrias no tienen ni planta de precipitación. Por ello se ha intentado la recogida de tortas de un mismo hidróxido para recuperar el metal. Hasta el momento estas iniciativas no han tenido éxito debido a la complejidad de las tortas de lodo procedente de filtros prensa que llegaban a la planta de tratamiento.

La Figura 6.22 muestra una serie de ensayos de inertización de lodos galvánicos en pastas cerámicas diseñadas expresamente para que la temperatura del proceso de ceramización sea baja. De hecho la única temperatura capaz de gresificar la pasta fue la máxima (1.010 ℃) y ello para una adición del 15% de lodo, que con la humedad del 75% supone un 3,75% de materia seca.

En estos casos la gresificación es indispensable habida cuenta de la refractariedad de la mayoría de los metales pesados presentes en los lodos (Ni, Cr). Técnicamente durante el proceso cerámico, el hidróxido pasa a óxido y éste a muy alta temperatura es atrapado por la fase vítrea que se forma en el proceso de la cocción cerámica.

Por ello es preciso una gresificación ya que así se garantiza una abundante fase vítrea. En cualquier caso se debe anotar que, a alta temperatura, la fase vítrea de una cerámica es un líquido muy viscoso y

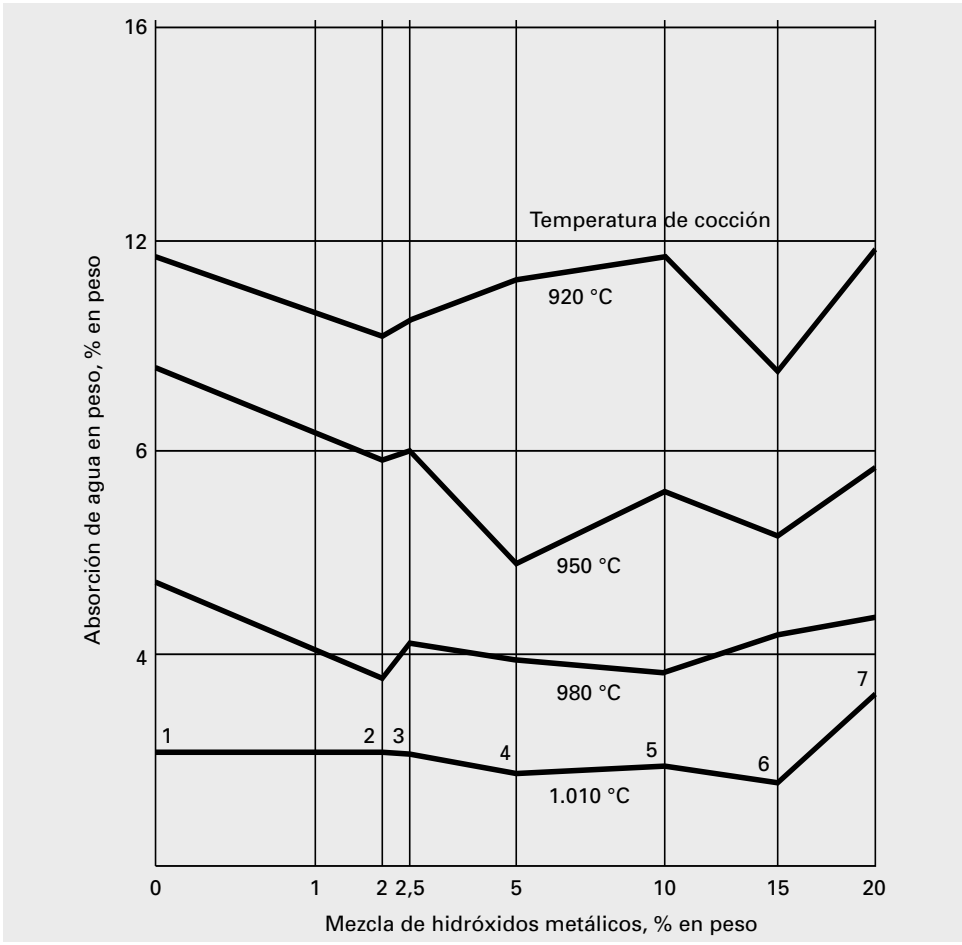


Figura 6.22. Ceramización de lodos galvánicos.

poco agresivo para atacar y englobar a óxidos refractarios, por ello las pastas del ensayo estaban diseñadas para que gresificaran a baja temperatura (En la gresificación la contracción ha de ser moderada y cuando ello se logra a baja temperatura el riesgo de deformaciones puntuales es elevado). Sin embargo ello entraña un evidente riesgo técnico a la hora de ponerlo en la práctica industrial a gran escala, por lo que la vitrificación parece ser la vía más correcta para el tratamiento de dichos residuos.

5.1. USO DE RESIDUOS DE CROMO EN LA INDUSTRIA CERÁMICA

La industria química, al producir dicromato de sodio, material usado a su vez también en la industria cerámica, genera un residuo con gran contenido de cromo hexavalente Cr^{6+}, metal considerado cancerígeno y soluble en agua. Hace medio siglo que en la zona de Cracovia (Polonia) se detectó una gran afectación al agua, fauna, vegetación y suelo debido a la importantísima presencia de cromo hexavalente.

Para paliar el problema, o impedir que prosperara, se desarrolló un proceso consistente en mezclar el residuo de cromo hexavalente con coque y sinterizar la mezcla en un horno en atmósfera, lógicamente reductora, con ello se logra que el Cr^{6+} se reduzca a Cr^{3+}. El producto final es una mezcla de cromo (Cr^{3+}) y dolomita.

La mezcla obtenida se emplea como pigmento colorante en la propia industria cerámica para la obtención de colores beige en los esmaltes cerámicos.

5.2. VALORIZACIÓN DE LODOS DE ANODIZADO

En las formulaciones cerámicas comunes el proceso de integración de ciertos residuos depende de la presencia y formación de una fase líquida. Los lodos resultantes de los tratamientos de superficie por anodizado ricos en Al son, en principio, compatibles con las matrices cerámicas.

Cuando se valorizan por ceramización, la fabricación debe monitorearse para poder mejorar la efi-

ciencia productiva. Para este fin, la técnica de espectroscopia de impedancia (IS por sus iniciales en ingles) se erige en una opción barata y simple como método no destructivo de medición. Esta técnica permite discriminar los diferentes tipos de grano en la cerámica, tamaño de poros y detalles morfológicos, además de las propiedades finales de los materiales analizados. Siendo las formulaciones cerámicas muy complejas, el comportamiento de las mismas en el proceso de cocción puede variar grandemente.

Con la ayuda de esta técnica y otras complementarias se ha podido observar que el proceso de ceramización en cerámicas que emplean materiales subproductos provenientes de lodos de tratamiento del proceso industrial de anodizado de aluminio tienen un comportamiento correcto durante la fase de cocción y se pueden obtener materiales cerámicos con buenas propiedades.

5.3. VALORIZACIÓN DE POLVOS DE LIJADO DE BARNICES Y MADERA

Los polvos resultantes del pulido del acabado de superficie de la madera barnizada (muebles, puertas, estructuras, etc.), contienen barnices, casi el 90% de los productos utilizados contienen poliuretano, como los barnices de acabado), melaninas (si hay aplacados especiales), madera (normalmente en forma de aserrín) y material abrasivo. En definitiva se trata de un polvo que es recogido por el sistema de captación en el filtro de mangas y contiene una fracción orgánica mayoritaria y otra inorgánica. Por tanto es un candidato excelente para ser valorizado en masas cerámicas (como se ha comentado ampliamente en el capítulo anterior).

Investigadores del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (perteneciente al CSIC) han realizado pruebas de laboratorio, que han denominado «xiloarcilla», donde han añadido cantidades entre el 3% y el 5% del citado residuo, con resultados satisfactorios. En el caso de aplicación a escala industrial en hornos túneles hay que tener en cuenta que en la etapa del precalentamiento del horno, zona que abarca desde la entrada hasta unos 700 ℃, se va a producir una pirólisis y más adelante una gasificación parcial de la fracción orgánica, que resulta ser la mayoritaria. En esta etapa tanto los gases de pirólisis como el gas de síntesis procedente de la gasificación tienen muy pocas posibilidades de oxidarse y lo más probable es que sean emitidos a la atmósfera por medio de la chimenea del horno. Así pues deberá arbitrarse un sistema de recirculación interno de gases para garantizar su total oxidación.

En este sentido existe abundante literatura ya que este tipo de valorización es, en algunos países (como Alemania) muy empleado. Efectivamente, la temperatura de los gases que circundan el material en la zona de precalentamiento es insuficiente para provocar la oxidación de los gases generados a pesar de la gran presencia de oxígeno.

6. La industria del cemento como vía de valorización de residuos

La fabricación del cemento exige temperaturas en el horno del orden de 1.450 ℃ para que se desarrollen las diversas reacciones, la mayoría de ellas en fase sólida, que da como resultado el clínquer constituido por silicatos y aluminatos de fórmulas complejas en forma de microcristales compuestos, esencialmente, por calcio, silicio, hierro, aluminio y oxígeno.

La producción de cemento requiere una considerable cantidad de energía, aproximadamente 900.000 kilocalorías por tonelada de clínquer producido, que es una cantidad equivalente a la energía calorífica de 100 kg de carbón. A ello hay que añadirle un consumo de energía eléctrica que se sitúa entre 90 y 120 kW · h/t de cemento. Tomando una media de ambos consumos se obtiene un total de 1.256 kW · h/t lo que supone, por ejemplo, un consumo energético total doble que el de una cerámica estructural que se sitúa en torno a los 620 kW · h/t. Desde los años ’70, las industrias cementeras norteamericanas y europeas consideraron que los residuos con alto contenido de energía, bajo contenido de cloro y bajo contenido de metales pesados podían ser usados en la industria del cemento como fuente de energía alternativa.

Así, las particulares características de los hornos de clínquer, como esquematiza la Figura 6.23, permiten el uso de combustibles residuales (co-incineración, de acuerdo con la Directiva 94/67/EC, siempre que el aporte energético del residuo no supere el

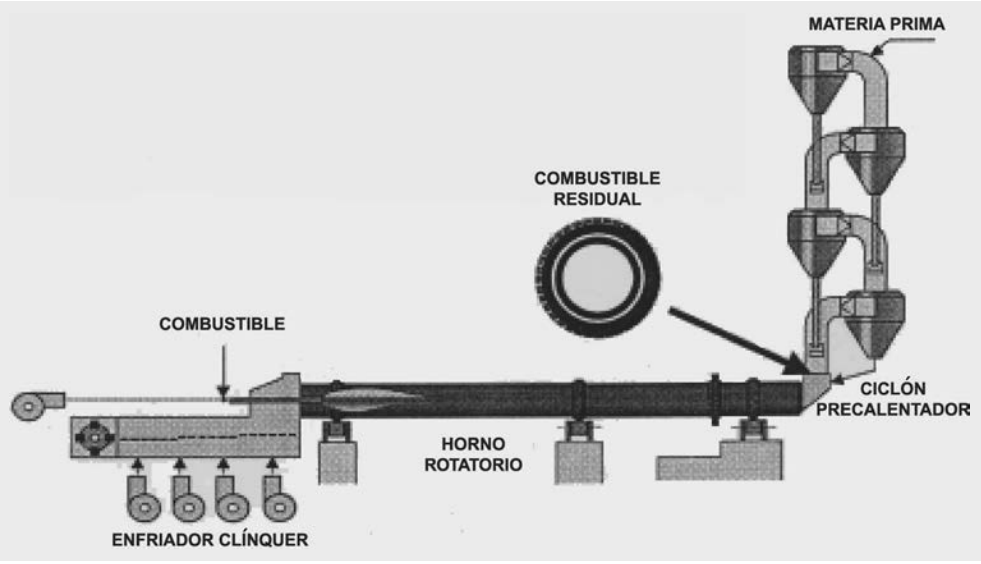


Figura 6.23. Esquema del proceso de producción de clínquer.

40% del consumo total), gracias a los largos tiempos de residencia, y a la adición de ciertos residuos junto a las materias primas.

Los hornos, rotatorios, suelen tener un diámetro de entre 3 y 5 m y hasta 150 m de longitud. El movimiento constante del material en el interior del horno propicia la reacción con otras sustancias-residuos, si estos están debidamente preparados, en particular por lo que afecta a su tamaño de grano y, naturalmente, son compatibles con la formulación del clínquer.

De hecho el cemento es de por sí una mezcla de residuos ya que al clínquer se le adiciona: escoria siderúrgica, cenizas volantes de centrales térmicas, puzolanas naturales o artificiales y, naturalmente: yeso.

6.1. LA NATURALEZA DE LOS CEMENTOS

Los cementos portlands son los que se utilizan para las tecnologías de solidificación, reciclaje y reutilización de residuos. Las materias primas empleadas en la fabricación del clínquer son caliza, arcilla y cuarzo. Una vez trituradas se introducen en un horno rotatorio a una temperatura media de 1.450 ºC (oscila de 1.250 ℃ a 1.600 ℃, según materias primas y tiempo de permanencia), donde se forman dos silicatos de calcio anhidros (Ca_3SiO_5 y Ca_2SiO_4) y un aluminato de calcio y ferroaluminato de calcio. Esta composición está muy cerca de las escorias metalúrgicas. La Tabla 6.10 muestra un resumen de la composición.

Tabla 6.10. Constituyentes de un cemento

Nombre del compuesto	Fórmula química	Abreviación
Silicato tricálcico	$3\ CaO \cdot SiO_2$	C_3S
Silicato dicálcico	$2\ CaO \cdot SiO_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3\ CaO \cdot Al_2O_3$	C_3A
Ferroaluminato tetracálcico	$4\ CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	C_4AF

La resistencia mecánica es debida a la suma de C_2S y C_3S (entre ambos acaparan el 60-80% del clínquer). Este último proporciona resistencia a corto plazo, mientras que el C_2S la desarrolla a largo plazo. El C_3A acelera el endurecimiento en las primeras horas de fraguado. Tratándose de aplicación de cementos a residuos conviene conocer que el C_3A es el compuesto responsable de la resistencia a los sulfatos. Todo porcentaje de C_3A inferior al 5% asegura un cemento resistente a los sulfatos (PAS).

6.1.1. El cemento y la valorización de residuos

Para las operaciones de reciclado de suelos contaminados se suele usar una mezcla de un 60% de cemento portland y el resto es una solución de silicato sódico, conocido normalmente como gel de agua ya que es un líquido viscoso, semejante a un jarabe, con una densidad de 1.400 kg/m^3. El cemento es el soporte mientras que el silicato sódico hace las veces de acelerador y agente antiinhibidor de las reacciones de fraguado del hormigón. La Tabla 6.11 reproduce las principales características de ambos.

Tabla 6.11. Características comparadas del silicato sódico y del cemento portland

Material	Composición química	% (peso)
Silicato sódico	SiO_2	28,7
	Na_2O	8,9
	Ratio (SiO_2/Na_2O)	3,22
Cemento portland	$3 \cdot CaO \cdot SiO_2$	4,5
	$2 \cdot CaO \cdot SiO_2$	27,0
	$3 \cdot CaO \cdot Al_2O_3$	11,0
	$3 \cdot CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	8,0
	MgO	2,9
	$CaSO_4$	3,1
	CaO (libre)	0,5
	Ratio (SiO_2/Na_2O)	3,22

Las principales características de los cementos cuando se utilizan para la inertización, solidificación o reciclado de contaminantes, deben ser:

- *Fraguado:* O endurecimiento de la mezcla con el tiempo debido a las reacciones que tienen lugar entre el cemento y el agua. La presencia de hidrocarburos, como el gasóleo retrasa el tiempo de fraguado. Los hidrocarburos clorados, al igual que los alcoholes, glicoles y fenoles, retrasan el tiempo de fraguado y, a la larga, destruyen el hormigón. Los ácidos y las sales de metales retardan algo el fraguado pero a la larga destruyen el hormigón. En cambio las bases inorgánicas no producen apenas efectos negativos a causa de la compatibilidad de pH's.
- *Resistencia mecánica:* La resistencia mecánica que debe tener un cemento dependerá de su aplicación final. En términos generales la resistencia mecánica, tanto a la compresión como a la flexión de un cemento disminuye con la adición de suelos contaminados con hidrocarburos. Este efecto se debe al carácter hidrófobo de los hidrocarburos que tienden a separar las partículas de cemento del agua.
- *Lixiviación:* Es la capacidad de retención de contaminantes en la matriz del hormigón. Naturalmente esta propiedad será una consecuencia inmediata de la composición química. Las fases cristalinas del clínquer al ponerse en contacto con el agua se hidratan y dan lugar a nuevas fases que proporcionan la resistencia. Éstas son las portlandita (cal hidratada) $Ca(OH)_2$ en un 20-25% en volumen y otra, amorfa, de naturaleza más compleja que procede de la hidratación de los silicatos y, en parte también, de la portlandita. Es un gel y constituye la fase principal (60-70% en volumen) denominada C-S-H (Calcium or Silica or Si-Water or H_2O).

Los factores que afectan de manera directa a la fijación y prevención de la lixiviación de los contaminantes se hallan en relación directa con:

- La gran superficie específica de la base C-S-H que permite la absorción y la adsorción de iones.
- La elevada alcalinidad que permite la precipitación de los hidróxidos insolubles.
- La posibilidad de incorporar sustancias en el retículo cristalino de las fases de dos componentes.

De hecho el fenómeno de la interacción y/o reacciones que tienen lugar durante el fraguado son muy complejas y van desde la pura encapsulación a la reacción química, la adsorción, la quimisorción, absorción, etc.

La degradación: Es un fenómeno de destrucción paulatina de la estructura del hormigón que obedece a diversas causas o combinación de ellas como: difusión de agentes agresores a través de reacciones en estado sólido, cristalización de fases, reacciones químicas, adsorción de iones químicamente muy activos y lixiviación.

La portlandita es la fase más soluble de todas las formadas en el fraguado. Por ello cuando se prevea una determinada condición de trabajo en la que sea fácil el contacto con líquidos agresivos, será preciso limitar la cantidad de esta fase.

La fuerte alcalinidad de los hormigones los hace especialmente resistentes a la agresión de los organismos vivos, ya que la actividad biológica es incompatible con pH muy altos (la cal se usa para estabilizar los fangos de depuradora), o muy bajos.

6.1.2. Obtención de cementos belíticos a partir de residuos industriales

Los denominados clínqueres belíticos de sulfoaluminatos y se obtienen por cocción de crudos a temperaturas moderados, sobre 1.250 ℃. Esos crudos se componen de carbonato de calcio mezclados con dos subproductos industriales: cenizas volantes pobres en óxido de calcio y fosfoyeso. La Tabla 6.12 muestra la composición típica de los residuos industriales citados.

Tabla 6.12. Caracterización de ceniza volante y fosfoyeso

Óxido	Ceniza volante (%)	Fosfoyeso (%)
SiO_2	48,3	9,5
CaO	7,0	30,5
Al_2O_3	30,6	2,8
Fe_2O_3	5,1	0,9
P_2O_5	0,9	0,5
SO_3	—	42,9
MgO	2,2	0,3
K_2O	0,6	—
MnO	0,1	—
F	—	0,1
Pérdida al fuego	4,8	9,8

Las fases principales de los cementos belíticos son C_2S, C_4A_3S y CS, como constituyentes mayoritarios y pequeñas proporciones de cal libre y fase ferrítica. Para la obtención a base de residuos y en función de la calidad de ceniza volante disponible, ésta se mezcla con caliza de modo que la relación Ca/SiO_2 sea 2. Seguidamente se le añade del 10 al 20% de fosfoyeso. Una vez conseguido el clínquer, para obtener el cemento se le adicionada un 7% de yeso.

Desde un punto de vista ambiental la impulsión de clínqueres como el indicado que además de emplear residuos, emplea componentes con cantidad importante de cal pero en forma de óxido y, por tanto no emite tanto CO_2. Esto es muy importante, sobre todo a las puertas de la entrada en vigor del Protocolo de Kyoto. Por otra parte siendo la temperatura de clinquerización mas reducida, redunda en un ahorro adicional de las emisiones de CO_2. Los cementos belíticos tienen un consumo energético medio de 1.340 kJ/kg, un 25% menos que un portland convencional. Por esta razón se les conoce como «cementos de baja energía».

La belita se hidrata lentamente, con lo cual estos tipos de cemento presentan una resistencia mecánica reducida a edades tempranas. Para mejorar esta carencia las belitas se refuerzan con fases adicionales más reactivas como el sulfoaluminato cálcico C_4A_3S.

6.1.3. El problema del cromo hexavalente en los cementos

El cromo hexavalente (VI) presente en los cementos comerciales es el causante de efectos nocivos en las personas que los manipulan, alergias en contacto con la piel, dermatitis, irritaciones del aparato respiratorio, bronquitis, sinusitis, etc., si es inhalado. Pero también lo es para el medio ambiente. El Cr(VI) es una especie tóxica y está considerada como cancerígeno potencial por la Organización Mundial de la Salud. Se sabe que la cantidad de cromo en el cemento, así como su valencia y solubilidad son decisivas para que se produzca la sensibilización de la piel. El cromo trivalente, Cr (III), aunque más nocivo que el hexavalente, produce menos problemas de dermatitis debido a su escasa solubilidad y capacidad de penetración en la piel.

Para regular la cantidad de Cr (VI) permitida, la UE ha dictado la Directiva 2003/53/CE, en la cual se prohíbe el uso y comercialización de cementos cuyo contenido en Cr (VI), una vez hidratado, sea superior a 2 ppm sobre el peso de cemento en seco, ya que a este metal se lo considera sustancia carcinogénica, mutagénica y sensibilizante.

El cemento contiene cantidades de cromo variables no solo procedentes de las materias primas empleadas sino también del desgaste de los refractarios del horno, normalmente de cromo/magnesita, y de la abrasión que sufren las barras de acero que se emplean para la trituración del clínquer, procedente de algunas incorporaciones de residuos, como escorias de alto horno, y del yeso que se adiciona para formular el cemento. Por lo general todo el cromo aportado es trivalente, lo que sucede es que durante la cocción, a elevada temperatura y en presencia de aire se oxida a Cr (VI).

La forma más viable de eliminación, o neutralización, es la reducción química del Cr (VI) utilizando diferentes reductores, como el sulfato ferroso heptahidratado (también sirve el monohidrato) comercial (SFHc) puesto que tiene un coste reducido y la cantidad necesaria no es muy elevada. La reacción básica buscada es:

$$CrO_4^{2-} + 3 \cdot Fe_{2+} + 4 \cdot OH^- + 4 \cdot H_2O \rightarrow$$
$$\rightarrow Cr(OH)_3 \downarrow + 3 \cdot Fe(OH)_3 \downarrow$$

Es decir, en medio acuoso provocar la precipitación de los hidróxidos de cromo y hierro. Por lo general el contenido en cromatos solubles, esto es Cr (VI), está alrededor de 4,1 ppm de Cr (VI). De ahí se puede deducir la cantidad de SFHc a utilizar, con un importante exceso de seguridad. Por lo general se ha visto que basta del orden de 1,5 g SFHc/kg cemento para cumplir con la normativa.

6.2. LA VALORIZACIÓN DE RESIDUOS EN LOS HORNOS DE CLÍNQUER

Las especiales características de los hornos de clínquer convierten a estos en unos singulares centros de valorización para una buena gama de residuos. Las particularidades más sobresalientes que aportan estas instalaciones son:

- *Elevada temperatura y prolongado tiempo de residencia:* Estos dos parámetros son los ideales para destruir los compuestos orgánicos, sean tóxicos o no. El quemador principal del horno genera un calor que desarrolla una temperatura media de gases a lo largo del horno siempre superior a los 1.000ºC (no hay que confundir con la temperatura de llama que suele ser muy superior). El tiempo de residencia de los gases en el interior del horno rotatorio supera los 4 segundos, mientras que el de retención de sólidos oscila de 1 a 4 horas. Condiciones más que suficientes para destruir la mayoría de los compuestos orgánicos. La Tabla 6.13 muestra los valores medios de los tiempos de residencia de los gases.
- *Gran inercia térmica:* El conjunto de las paredes del horno más el propio clínquer representa una enorme masa que, a la temperatura de trabajo, constituye una importante inercia térmica. Esta actúa de termorreguladora y garantiza el mantenimiento de las temperaturas en el caso de que el caudal de combustible entrante, o el PCI del mismo, sufrieran alteraciones transitorias.
- *Atmósfera oxidante:* Los gases de combustión en el interior del horno tienen un porcentaje de oxígeno que oscila del 2 al 6%. Ello representa una garantía imprescindible para oxidar la materia orgánica que se introduce en el horno.
- *Medio alcalino:* El principal constituyente del clínquer es la caliza. A partir de los 700ºC, según la pureza y cristalinidad de la misma, ésta se descompone desprendiendo CO_2. El óxido de cal remanente propicia un medio alcalino que proporciona una neutralización de los gases ácidos, si estos se han podido generar a partir de los residuos introducidos.

En resumen la fabricación de cemento permite la valorización de residuos en tres fases distintas:

- Como materia prima.
- Como combustible.
- Como aditivo al clínquer.

La Figura 6.24 muestra un balance de masa y energía para la fabricación de cemento donde se ven las posibilidades de uso de los residuos.

Tabla 6.13. Valores medios de tiempo de residencia de gases en la fabricación del clínquer

Equipos	Filtro	Molienda crudo	Cond. Gas torre enf.	Precalentador	Precalcinador	Horno rotativo	Enfriador
Tiempo retención gases	~15 seg.	~2 seg.	~10 seg.	~10 seg.	~3 seg.	~10 seg.	~1 seg.
Tiempo retención materiales	60 seg. ~30 min	30 seg. ~30 min		~50 seg.	~5 seg.	~30 min	~30 min

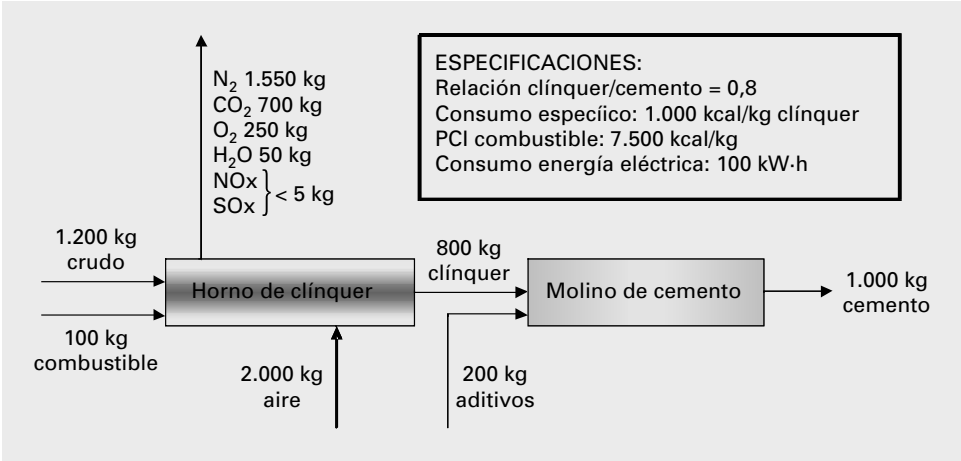


Figura 6.24. Balance de masa en la fabricación de cemento.

Como indica el esquema en todas las entradas es posible añadir residuos. La materia prima denominada crudo, que es la que presenta mayores posibilidades de introducir residuos, está compuesta por caliza, margas o arcillas. En cambio es en la partida de aditivos donde la incorporación de residuos está más generalizada: yeso, cenizas volantes de centrales termoeléctricas, puzolanas, escorias metalúrgicas, etc.

6.2.1. Demanda térmica en la producción de clínquer

Teniendo en cuenta el consumo especifico antes indicado de 1.000 kcal/kg de clínquer (suponiendo que no hay recuperación de calor), equivalentes a 4,18 MJ/kg, y que una fábrica estándar es capaz de producir un millón de toneladas de clínquer al año, es fácil adivinar la importancia de valorizar residuos energéticamente antes de que estos vayan a parar a un vertedero.

La Tabla 6.14 muestra los diversos estadios consumidores de energía en la fabricación de clínquer por vía seca.

Tabla 6.14. Etapas de consumo energético en la fabricación de clínquer

Fase	Consumo MJ/kg
Calentamiento del crudo hasta 450 °C	0,71
Deshidratación a esta temperatura	0,17
Calentamiento de 450 °C a 900 °C	0,82
Descarbonatación de la caliza a 909 °C	1,99
Calentamiento desde 900 °C a 1.400 °C	0,52
Reacciones de clínquerización	0,10
TOTAL	4,31

De la tabla anterior se deduce que tan solo la etapa de descarbonatación absorbe el 46% del calor suministrado. Además hay que tener presente que el calor de los gases calientes se recupera, precisamente para calentar el crudo con lo que las necesidades energéticas reales son inferiores. Por otra parte, el ejercicio, teórico, también parte de la base de que se alcanzan los 1.400 ℃, temperatura que, en la realidad no se llega.

La Tabla 6.15 muestra, en la forma que suele entenderse en la industria del cemento, los PCI de diversos combustibles residuales agrupados en tres niveles: de alto, medio y bajo PCI. Se trata de valores promediados ya que siempre son residuos.

Tabla 6.15. PCI de combustibles alternativos usados en la industria cementera

Residuo	PCI MJ/kg	PCI kcal/kg
PCI alto		
Polietileno	46,0	10.985
Petróleo pesado	39,8	9.500
Grasa animal	38,9	9.290
Alquitranes	38,1	9.100
Aceites automoción	33,5	8.000
Fangos de refinería de petróleo	31,0	7.400
Neumáticos fuera de uso	35,0	8.360
Carbón bituminoso pobre en cenizas	29,0	6.925
Plásticos mezclados	26,4	6.300
Carbón bituminoso rico en cenizas	23,8	5.680
PCI medio		
Lodos y alquitranes ácidos (destilación petróleo)	18,5	4.420
Lignito	17,0	4.060
Residuos de aceite de palma (10% humedad)	18,9	4.500
Harinas de animales	18,4	4.400
Residuos del prensado de olivas	18,0	4.300
Textiles mezclados	18,0	4.300
Tierra de batán (destilación del petróleo)	15,9	3.800
Madera, corteza y serrín (10% humedad)	15,5	3.700
PCI bajo		
Cascarilla de arroz (10% humedad)	15,9	3.800
RDF de RSU seleccionado (10% humedad)	15,1	3.600
Papel y cartón (secado al aire)	15,1	3.600
Fangos de EDAR (10% humedad)	10,0	2.400
Aceite de esquistos	4,2	1.000

Es obvio que las cementeras hagan esta distinción puesto que les interesa consumir residuos combustibles del máximo PCI, puesto que el almacenaje y sistemas de distribución son más compactos y baratos. En España el combustible comúnmente usado, el coque de petróleo, tiene un PCI de 31,4 MJ/kg, es decir se sitúa en la banda alta de combustibles. No obstante, ambientalmente es igual o peor que otros muchos combustibles residuales citados ya que contiene, por ejemplo, una gran cantidad de azufre.

Uno de los sistemas de valorización energética que con el tiempo se impondrá es la gasificación.

Ella permite enviar solo el gas de síntesis al horno de clínquer en lugar de aportar combustible sólido. A la vez en el sistema, el gas de síntesis se puede someter a un nivel de depuración tan sofisticado como se quiera. Poniendo por caso la cascarilla de arroz, mediante la gasificación se valoriza el gas de síntesis en el horno y el residuo propio de la cascarilla, la sílice amorfa (microsílice) se separa y valoriza a parte. Hacerlo directamente supone la incorporación de la ceniza de cascarilla al clínquer, que si bien es perfectamente compatible, no aporta ningún valor económico.

La Figura 6.25 muestra, en datos de 2002, la media de combustibles que se emplean, expresados en porcentaje, en la UE en comparación con España.

En la UE existen alrededor de 230 fábricas de cemento de las que la mitad utilizan residuos como combustibles. Si bien, como muestra el gráfico, la media de sustitución en la UE es del 13%, hay algunas plantas donde se ha logrado alcanzar el 50%, a base de neumáticos, harinas cárnicas y aserrín impregnado con disolventes. Hay que comentar que, en pura ortodoxia ambiental tanto el coque de petróleo como el fuelóleo deberían considerarse también residuos.

Es obvio que existen ciertas limitaciones en el empleo que vienen supeditadas a que ciertos contaminantes no afecten a la calidad del clínquer ni a las instalaciones. Entre ellas cabe mencionar los siguientes casos:

- Óxido de magnesio: por encima aparece MgO (periclasa), reacciona con el agua de fraguado formando $Mg(OH)_2$, fenómeno que se conoce como "la expansión por magnesia"
- Azufre: En exceso puede ocasionar la formación de anillos de costra en el horno rotatorio. El azufre del combustible se transforma en sulfatos que se retienen en el clínquer. En el cemento es necesaria una cantidad (máximo de 2,5% a 4%) de sulfato cálcico (yeso molido) para regular el tiempo de fraguado.
- Cloro: forma cloruros en presencia de álcalis que son transportados por los gases y se precipitan en el intercambiador de calor. El límite se establece en 200 ppm.
- Fósforo: Contenidos de más de 0,5% de P_2O_5 pueden provocar fuertes retrocesos en las características del cemento, principalmente en la resistencia a edades tempranas.
- Metales pesados: la mayoría de los metales se retienen por adsorción, parcialmente, en el clínquer. Para el caso del Sb, As, Ba, Be, Cd, Cr, Cu, Pb, Ni, Se, Ag, V y Zn se han medido retenciones elevadas. En el caso de metales más volátiles como el Hg y el Tl, los porcentajes de retención son menores, lo que obligará a controlar su concentración en las materias primas y los combustibles.

6.2.2. Uso de escoria de cobre como materia prima para la fabricación de clínquer

La industria de la minería, en especial la del cobre, genera ingentes cantidades de residuos. Uno de ellos es la denominada escoria de fundición que se produce en los hornos rotatorios, donde en el proceso final se añade algo cal y arena para fluidificar la escoria y ésta pueda licuarse fácilmente a unos 1.200 ℃, temperatura a la cual se sangra y se deja enfriar al aire libre para luego ser abandonada en un barranco. Pese a que por tratarse de un residuo vitrificado y por ende inerte, las grandes cantidades que se producen (en Chile las cantidades ascienden a millones de to-

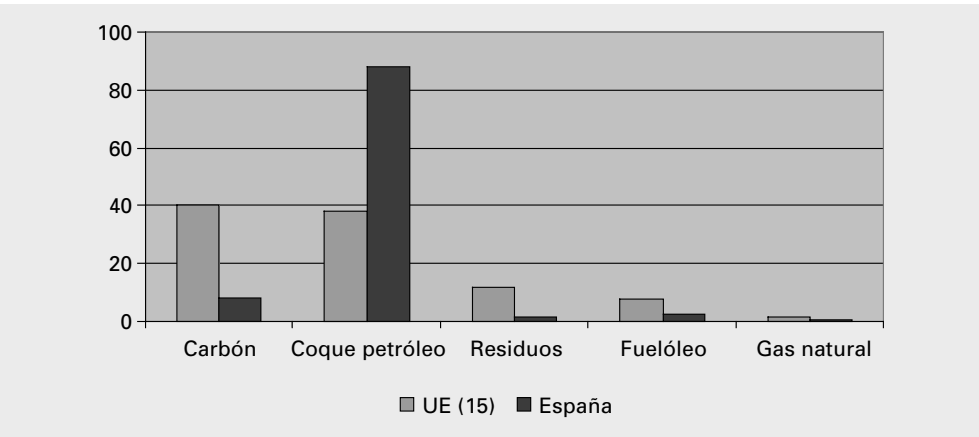


Figura 6.25. Tipos de combustibles usados en los hornos de clínquer.

neladas cada año), es conveniente explorar las posibilidades de valorización.

Una de ellas es la posibilidad de usarla como materia prima para la fabricación de clínquer para el cemento Portland, como sustituto de parte de cuarzo y hematites en la formulación del clínquer. Al tratarse de un material vitrificado la escoria tiene la propiedad de la gran reaccionabilidad, lo que se traduce en una disminución de la cantidad de cal libre en el hormigón fabricado con este tipo de clínquer.

Las reacciones de clínquerización tienen una cinética muy lenta y es preciso sobrepasar los 1.250 ℃ para activar el sistema CaO-SiO_2-Al_2O_3-Fe_2O_3 (todos ellos presentes en la escoria de cobre) que son los ingredientes básicos del clínquer, puesto que la presencia de óxidos alcalinos, MgO, TiO_2, P_2O_5, etc., se presentan como impurezas.

Gracias a estas impurezas, que en la fabricación clásica del clínquer provienen mayoritariamente de la arcilla, las reacciones se llevan a cabo, ya que la formación de alita (silicato tricálcico) a partir de la reacción entre la belita (silicato dicálcico) y el óxido cálcico ocurre en presencia de fase líquida, auque muy limitada. Por tanto, el proceso cinético está muy influenciado por la presencia de fundentes y/o mineralizadores. El más efectivo de ellos es el óxido de hierro (cuya presencia suele superar el 40% en la escoria). Los elementos perjudiciales como el Cu, Pb o Mo se hallan presentes en pequeñas cantidades en la escoria de cobre, todo lo cual favorece su empleo como materia prima.

Otro parámetro favorable a considerar es que la escoria tiene una estructura mineralógica básicamente amorfa, sobre todo si se enfría rápidamente a medida que sale del horno (cosa que no se hace en la actualidad), lo cual repercute en aumentar su reactividad y se traduce, a su vez, en una reducción de la temperatura de clínquerización, además del ahorro de la materia prima.

El empleo de cemento fabricado con escoria presenta otra ventaja de cara a la valorización de residuos con elevado contenido en metales pesados, en particular los semivolatiles como el Zn, Pb, Cu o Ti, ya que al existir una presencia de vidrio (la propia escoria) a relativa baja temperatura, éste es capaz de integrar los metales en la red vítrea con cierta facilidad (de todas maneras se ha comprobado que el Pb es muy difícil de retener).

Finalmente hay que considerar que el hormigón confeccionado con cemento fabricado con escoria de cobre tiene la ventaja adicional de tener menos óxido de cal libre (la reducción puede superar el 15%), o en otras palabras que una menor cantidad de cemento en la que se ha usado escoria tiene la misma resistencia mecánica que otro fabricado convencionalmente. Es decir, un sistema para minimizar la producción de cemento convencional.

6.3. CONSECUENCIAS AMBIENTALES DE LA INCORPORACIÓN DE RESIDUOS AL CLÍNQUER

En el anterior apartado se han citado algunas de las propiedades que hacen de los hornos de clínquer instalaciones apropiadas para la valorización y tratamiento de residuos. No obstante, es preciso diferenciar el comportamiento de los diversos componentes que integran el residuo en función de su naturaleza.

Residuos orgánicos: Los hornos de clínquer son ideales para quemar residuos orgánicos y aprovechar el calor de combustión. Así pues es un medio idóneo para la valorización de disolventes, grasas, fangos de papelera, textiles, plásticos, etc. Además todo ello es posible llevarlo a cabo con independencia de la presentación física del residuo: sólido, líquido o pastoso.

Residuos inorgánicos: es obvio que al horno se le pueden añadir todos aquellos residuos cuya composición resulte compatible con la propia formulación del cemento como: arenas de fundición, cenizas de pirita, lodos de drenaje o ciertas tierras contaminadas.

Residuos mixtos: Denominados así puesto que por una u otra razón presentan una faceta no bien resuelta en la valorización tales como neumáticos, fangos de EDAR, lodos de pintura, catalizadores, lodos de la industria del tratamiento de superficies, etc. El principal problema de todos ellos radica en la presencia de los metales pesados. Sabido es que la co-combustión o la incineración no destruyen los metales, sino que los dispersa. En esta tesitura el metal se encuentra «libre» en un medio a elevada temperatura donde se llevan a cabo reacciones en estado sólido propias de la síntesis del clínquer. Las reacciones en estado sólido son aquellas que se realizan sin intervención de la fase amorfa, o vítrea (líquida a esta gama de temperaturas) y tienen una cinética de reacción muy lenta. Así pues, se pone de manifiesto la ausencia de un medio (la fase amorfa) capaz de atrapar a los metales e insertarlos en su red. Llegados a este punto habría que distinguir el

comportamiento de los metales pesados más comunes según:

- *Metales altamente volátiles:* como el mercurio o el talio. Ambos volatilizan a muy baja temperatura y son evacuados por la corriente gaseosa, tal y como sucedería con cualquier otro tipo de tratamiento térmico. Por ello debe evitarse la presencia de estos metales en los residuos a valorizar o limitar estas clases de tratamientos, sin medidas correctoras, cuando hay constancia de su presencia.
- *Metales volátiles:* principalmente son el plomo, el arsénico y el zinc. En las condiciones del horno los metales se oxidan pero los óxidos también volatilizan, en especial los de plomo. El problema del Pb y del Zn es que precisan de un medio líquido para su retención pero, si pasan a la fase gaseosa las posibilidades de retención son muy bajas.
- *Metales refractarios:* son aquellos en que tanto el metal como sus óxidos son estables a altas temperaturas como el Cr, Ni y, en menor escala, el Mn, Cu y el propio Fe. La problemática de estos metales, o bien de sus óxidos es diferente ya que permanecen mucho tiempo junto al clínquer no obstante su integración es problemática ya que su refractariedad (estabilidad mecánica a alta temperatura que se traduce en una baja reaccionabilidad) dificulta la integración en la red cristalina del clínquer.

Prueba concluyente de todo ello es el ensayo llevado a cabo en una fábrica de cemento de Québec (Canadá) donde se analizaron sistemáticamente las emisiones de dos hornos de clínquer gemelos, el uno quemando sólo carbón y el otro el mismo combustible más neumáticos. El estudio demuestra que la emisión de metales a la atmósfera aumenta significativamente al sustituir un 20% de carbón por neumáticos. El estudio concluye que las emisiones se incrementaron en: Fe (+65%), Al (+33%), Zn (+490%), Mn (+100%), Cr (+340%) y Pb (+125%). Sin embargo ello no constituye una violación de la normativa vigente puesto que la dilución en estas instalaciones es enorme y jamás son superados los límites de emisión.

Para comprender bien estos incrementos hay que hacer mención a la presencia de contaminantes naturales en los combustibles convencionales y en las materias primas naturales. Si los contaminantes se hallan formando parte de la red cristalina del mineral, como acontece en la mayoría de los casos, la posibilidad de emisión es muy baja. Pero si el contaminante no se halla ligado químicamente a la materia prima, o al combustible, tiene muchas probabilidades de ser emitido. Ello explica la presencia de metales en la formulación de cementos comerciales en cuya fabricación no se han adicionado residuos.

La Tabla 6.16 muestra la presencia de metales pesados en cementos comerciales, indicando la procedencia más habitual del contaminante.

Tabla 6.16. Metales pesados en los cementos

Metal	Concentraciones normales mg/kg	Concentraciones altas (*) mg/kg	Fuente contaminante
Ag	21	30	Carbón
Cd	52	4	Arcilla
Co	168	136	Arcilla
Cr	724	2.168	Escoria LD (**)
Cu	206	80	Arcilla
Ni	116	220	Escoria LD (**)
Pb	172	82	Arcilla
V	660	2.667	Escoria LD (**)
Zn	532	590	Carbón

(*) Sólo en las materias primas. (**) La escoria se añade al clínquer.

6.3.1. Emisiones de organoclorados

Las dioxinas y los furanos son compuestos tóxicos formados por anillos bencénicos en cuyos radicales se insertan oxígenos y cloros. Ello da lugar a un sinfín de isómeros de los cuales unos pocos son extremadamente tóxicos. Son compuestos térmicamente estables hasta una temperatura aproximada de 600 ℃. Son liposolubles y muy poco solubles en agua. Debido a ello son muy estables y de ahí su persistencia en el medio (se han encontrado dioxinas en muestras históricas). En conclusión, hay formación de dioxinas y furanos en cualquier proceso de combustión, también existe una formación natural de dioxinas en el cieno y en el compost. Los incendios naturales generan muchas más dioxinas que los procesos industriales.

Un nivel térmico que asegure una temperatura de 800 ℃ durante un tiempo de residencia de, al menos, dos segundos garantiza la destrucción de estos compuestos. Esta particularidad se cumple con creces en los hornos de clínquer, donde la temperatura excede de 1.200 ℃ y el tiempo de residencia de los gases puede superar los cinco se-

gundos. Sin embargo, se da la paradoja de que la propia instalación térmica, en la zona de baja temperatura (enfriamiento de los gases), puede ser la generadora de dioxinas y furanos. Es la llamada síntesis «de novo». Durante el enfriamiento de los gases se reforman las dioxinas entre 500 y 250 ℃, por ello se recomienda acelerar la velocidad de enfriamiento de los gases.

Según el inventario español y europeo de dioxinas y furanos, las plantas cementeras no exceden el valor de 0,1 ng I-TEQ/Nm^3. El inventario también pone de relieve que no se observan diferencias significativas de emisión de organoclorados cuando se emplean combustibles residuales, principalmente harinas de animales y neumáticos.

La industria cementera, a diferencia de las incineradoras de RSU, por el momento no están obligadas a llevar a cabo un control de la emisión de dioxinas y furanos procedentes del empleo de estos residuos secundarios. Debido a la síntesis de novo los organoclorados que se sintetizan, como acontece en la incineración y no siempre quedan retenidas en el material fino.

6.4. CONTRIBUCIÓN DEL CEMENTO A LA VALORIZACIÓN DE RESIDUOS

Sin lugar a dudas, el empleo mas importante del cemento consiste en su aplicación a la fabricación de hormigón. Por término medio la composición de un hormigón estándar para la fabricación de prefabricados es la siguiente:

- Árido (grava): 23%
- Árido (gravilla): 23%
- Árido (arena): 45%
- Cemento: 9%

Esta estructura da idea de las posibilidades de valorización de residuos en cada una de las fracciones.

Existen infinidad de residuos aptos para ser empleados en la formulación de materias primas para la entrada al horno de clínquer. Para obras públicas y edificaciones comunes, la cantidad de cemento sobre el hormigón oscila entre el 12 y el 14%. La Tabla 6.17 indica unos ejemplos.

En los apartados posteriores se comentan las posibilidades de valorización de residuos partiendo del cemento como elemento aglutinante para la solidificación del conjunto. En función del tipo de residuo disponible se pueden hacer encapsulaciones para la fabricación de bloques o ladrillos con cemento.

Tabla 6.17. Residuos aptos como materias primas para el clínquer

	Fango papelera	Deconstrucción	Escoria blanca	Arenas de fundición
SiO_2	0,1	31,8	4,5	91,8
Al_2O_3	0,1	5,6	22,5	2,6
Fe_2O_3	0,1	9,0	3,7	0,4
CaO	54,0	25,3	46,7	0,2
MgO	0,3	1,2	10,9	0,4
$(Na, K)_2O$	1,8	1,2	0,1	0,5
SO_3	0,1	1,2	0,3	0,1

El sistema consiste en introducir el residuo, por ejemplo escorias metalúrgicas, con un determinado tamaño de grano según el acabado superficial que se desea obtener en el ladrillo, en una matriz de cemento Portland y colorear la masa.

Estas aplicaciones están pensadas, por lo general, para exteriores. Con frecuencia el valor del pH de la propia lluvia es muy ácido (en las cercanías de la ciudad de Barcelona se han registrado valores próximos a 4). En esta tesitura el hormigón es atacado químicamente y puede facilitar el lixiviado del árido (residuo) de relleno. Con todo, la mayoría de los ladrillos fabricados de esta manera cumplen con los requerimientos exigidos por la norma europea EN 1338, referente a las prestaciones mecánicas.

Las escorias metalúrgicas por su forma de generación, tienen una estructura eminentemente vítrea, por tanto es difícil que pueda existir un problema de lixiviado. No obstante, si se prevén escenarios de este estilo hay que conocer bien la estructura mineralógica del residuo, usar otro tipo de cemento o bien emplear el material en lugares al abrigo de este problema.

Para terminar esta introducción es preciso hacer una referencia a los propios residuos de las hormigoneras y los camiones cuba que transportan el hormigón. Cuando, por el motivo que sea, la cuba no puede acabar de descargar todo el material en la obra regresa a la planta (hormigonera) y vierte el material sobrante en un tromel donde existe una corriente de agua que disgrega los materiales. Los áridos, limpios, se reciclan y el agua se decanta para hacer precipitar el cemento que queda inservible. El único residuo final es el cemento.

6.4.1. Reciclaje de cenizas volantes de RSU en matriz de cemento

Las cenizas volantes de las incineradoras de RSU (CV) se obtienen en el filtro de mangas, como con-

secuencia de la deposición de material particulado y de restos de inquemados presentes en la corriente de gases.

Otra tipología de esta clase de residuos son los residuos de depuración de gases (RDG) que se recogen en los filtros de mangas como consecuencia del tratamiento de los gases de las incineradoras cuando estos son puestos en contacto con lechada de cal en un sistema de depuración de gases en semiseco.

La Tabla 6.18 reproduce un análisis químico típico de ambos residuos.

Sobre las probetas realizadas con estos residuos y cemento Portland, se llega a la conclusión de que las hechas con CV retrasan considerablemente el fraguado (las CV inhiben la hidratación del cemento), mientras las RDG causan episodios de falso fraguado debido a la elevada cantidad de sulfatos. A pesar de estos fenómenos, esta tecnología es, de momento, inevitable para el tratamiento de ambos residuos, toda vez que no presentan lixiviación apreciable de metales debido al fuerte pH alcalino.

Tabla 6.18. Caracterización de cenizas volantes de RSU y polvos de filtro

Óxido	Ceniza volante (CV)	Polvos de filtro (RDG)
	Elementos mayoritarios (%)	
Al_2O_3	12,7	7,1
P_2O_5	2,7	1,6
K_2O	4,2	4,3
CaO	24,3	27,7
SiO_2	18,7	15,0
TiO_2	1,5	1,0
MnO	0,1	0,06
Fe_2O_3	1,6	1,5
MgO	2,6	1,9
Na_2O	5,8	4,1
Cl	8,3	11,5
SO_3	6,4	8,2
Metal	**Elementos minoritarios (mg/kg)**	
Cr	365	276
Zn	9.382	11.390
Pb	5.461	3.120
Ni	117	51,5
Ba	1.000	690
Cu	1.322	465
As	<50	<50
Cd	150	150
Hg	0,3	2,8

6.4.2. Hormigones celulares con cenizas volantes de RSU

El hormigón celular, que en realidad debería llamarse mortero (puesto que no tiene áridos gruesos ni medios), es una mezcla de arena silícea finamente molturada (40%), cemento (9%), cal (9%), yeso (1,5%), polvo de aluminio (0,5%) y agua (40%). Una vez la mezcla ha fraguado se somete a un proceso de curado en una autoclave.

Se caracteriza por una razonable resistencia a la compresión (entre 3 y 10 N/mm^2), una reducida densidad (400 a 800 kg/m^3) y elevada porosidad. Estas propiedades se consiguen mediante la reacción del aluminio con la cal, desprendiendo hidrógeno que genera un gran volumen de huecos.

Añadiendo cenizas volantes de incineración de RSU en detrimento de las cantidades de cemento y cal, se observa un efecto expansivo superior. Este efecto es debido a la presencia de las cenizas y el agua. Las cenizas volantes de incineradora de RSU a diferencia de las cenizas de centrales termoeléctricas no poseen carácter puzolánico, debido a que no tienen sílice reactiva. Por tanto el efecto de expansión deberá atribuirse a la reacción con el agua y a la formación de fases a base de aluminatos cálcicos hidratados.

Cuando además de sustituir parte del cemento y cal por cenizas volantes, se sustituye una cantidad de arena se nota un incremento en la resistencia mecánica del hormigón celular. En cualquier caso no hay que olvidar que el aislamiento térmico (porosidad cerrada) y la resistencia mecánica son propiedades físicas contrapuestas, por lo que deberá llegarse a una composición de equilibrio. En pruebas experimentales llevadas a cabo se ha llegado a una incorporación del 30% de cenizas volantes en la formulación de estos materiales aislantes.

6.4.3. Hormigón para bases y subbases a partir de fango de depuradora y material de derribo

El método consiste en realizar mezclas de cemento portland, fangos de depuradora y cascote procedente de derribo (proyecto «llot»). Sabido es que los granulados obtenidos a partir de los derribos conven-

cionales presentan una absorción de agua muy superior a la de los áridos convencionales, por lo que será preciso aplicar un sistema especial para evitar defectos en el hormigón.

Los fangos de depuradora presentan características hidrófugas, con posterioridad a las mezclas con cemento, aditivos y áridos. Es ésta la propiedad que se aprovecha para proveer la cantidad adicional de agua que precisan estos áridos.

Otra novedad, patentada por la consultora ambiental Ambisat, consiste en la inserción de fangos de EDAR en hormigón a base de cemento Portland y cal. La cal al hidratarse genera una reacción muy exotérmica que evapora parte del agua de los fangos. Sin embargo hay que tomar precauciones a la hora de usar estos hormigones, al igual que el caso del proyecto «llot» antes citado, ya que la materia orgánica permanece en el interior de la matriz y con el tiempo se va descomponiendo, generando gases.

Por otro lado los metales presentes en el fango es el principal problema medioambiental. Para ello es preciso diseñar el hormigón bajo los siguientes principios:

- *Crear un pH fuertemente alcalino:* que garantice la higienización de una serie de compuestos orgánicos y, sobre todo, las propiedades de retención química de ciertos iones (en particular Zn, Pb, Cd, Cu y Ni). En medio alcalino y agua estos metales forman hidróxidos insolubles que, más tarde, quedarán encapsulados en la matriz del hormigón.
- *Conseguir una permeabilidad muy baja:* que dificulte el paso del agua y los posibles lixiviados. El transporte de líquidos en el hormigón depende del sistema de poros, del tipo de líquido, de la temperatura y de la humedad. Los mecanismos que predominan son la succión capilar y la difusión. La fijación de los metales pesados cierra más el sistema de poros y dificulta el transporte. En cuanto a los compuestos orgánicos la gran alcalinidad los hace insolubles, o muy poco solubles y los higieniza.
- *Lograr una resistencia a la compresión y a la flexotracción adecuadas:* Como muestra el gráfico de la Figura 6.26, la resistencia a la compresión con la edad es más que suficiente para las aplicaciones a las que se destinan estos hormigones.

Los ensayos de las dosificaciones se han llevado a cabo con relaciones ligante-fango que oscilan de 1:1 a 1:2. Los porcentajes de fango oscilan del 5 al 7,5% para hormigones resistentes a valores del 25 hasta el 50% para hormigones pobres.

El material puede incorporar hasta un 55% de cascote de derribo con tamaño comprendido entre 5 y 25 mm.

6.4.4. Hormigones aligerados

Se fabrican hormigones ligeros a base de cemento, arena y poliestireno expandido. Para ello se requiere alcanzar una densidad aparente inferior a 600 kg/m^3. Para conseguir estas propiedades debe contarse con el concurso de materiales puzolánicos. La Tabla 6.19 muestra unos órdenes de magnitud de las mezclas.

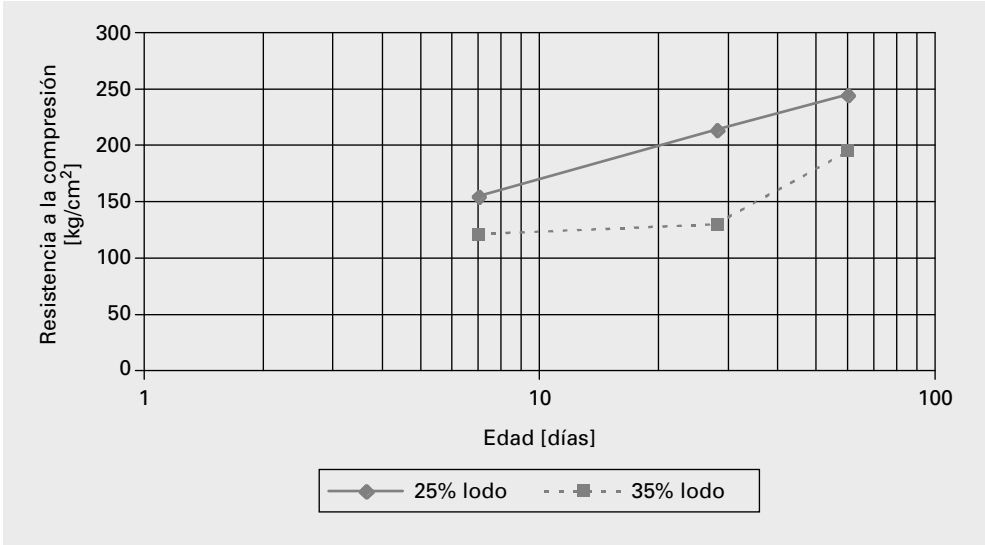


Figura 6.26. Resistencia a la compresión de hormigones con fangos de EDAR.

Tabla 6.19. Mezclas para hormigones de poliestireno

kg/m³	Poliestireno (dm³)	Portland (kg)	Arena (kg)	Agua (kg)
300	1.100	200	0	100
600	1.080	380	90	140
800	1.040	390	260	160
1.000	825	400	350	180
1.300	660	390	680	160

Es importante y crítica la mezcla de las materias primas y el fraguado. El hormigón de 600 kg/m³ alcanza, a los 28 días del fraguado una resistencia a la compresión de 2,2 MPa y una capacidad de absorción de agua del 21%. Presenta una excelente resistencia al fuego, en particular porque se trata de un material muy aislante térmico, lo que dificulta el paso del calor hacia el interior. También es un notable absorbente acústico.

También se fabrican hormigones aligerados con una infinidad de residuos de la industria agroalimentaria y/o áridos expandidos. La Tabla 6.20 muestra unos cuantos ejemplos.

Tabla 6.20. Características de hormigones aligerados

Material residual	Densidad kg/m³	Conductividad W/m °C
Poliestireno expandido	25	0,03
Cascarilla de arroz	650	0,11
Aserrín de madera	720	0,177
Cáscara de coco	700	0,11

6.4.5. Hormigones de áridos reciclados

La cantidad de material procedente de reconstrucción es cada día más importante. En España se puede cifrar en 750 kg por persona y año, de los que, aproximadamente el 75% corresponde a materiales inertes formado por cerámica, hormigón, áridos y rocas. Desde el punto de vista de la reutilización los que tienen mayor interés para la reutilización como sustituto de áridos en la formulación del hormigón son los procedentes del propio hormigón.

La caracterización y las propiedades que deben cumplir estos áridos reciclados se hallan bien especificados en las normas y, básicamente son:

- *Granulometría.* (UNE-EN-933) En general todos los áridos reciclados presentan curvas granulométricas continuas (de hecho esta propiedad depende más del sistema de trituración empleado que del residuo).
- *Porcentaje de finos.* (UNE-EN-933) En la que se establecen las máximas cantidades de finos que puede haber en un huso.
- *Coeficiente de forma.* (UNE 7238) Donde se normaliza la forma del árido. En general, los áridos empleados para la formulación del hormigón son angulosos, con numerosas caras de fractura, esta propiedad también depende de la maquinaria empleada.
- *Índice de lajas.* (UNE 933-3), suele ser mayor en los áridos naturales.
- *Dureza.* (UNE 1097) en general, los áridos naturales presentan mayor desgaste que los naturales a causa del desprendimiento de los restos de mortero adherido.
- *Densidad.* (UNE 83133) También dependerá del sistema de trituración usado, si bien el árido reciclado suele presentar una densidad del orden de un 10% inferior a su homólogo natural.
- *Absorción.* (UNE 83133) La absorción de los áridos naturales suele ser muy inferior a la de los áridos reciclados. Ello es debido a las fracciones finas que permanecen adheridas.

En resumen las fracciones de áridos reciclados seleccionados son adecuadas para la fabricación de hormigones según la norma EHE, sólo la densidad y la absorción son los parámetros que los diferencian de los convencionales. La cantidad máxima que se aconseja de sustitución es del 50%. Sin embargo para determinadas aplicaciones en lugares donde la carencia de áridos naturales es importante, se formulan hormigones con una tasa de sustitución del 100%.

El empleo de áridos procedentes de hormigón es muy habitual en los países del norte de Europa, donde la escasez de áridos naturales es casi absoluta. Otra fuente tradicional de extracción de áridos naturales son las graveras, sin embargo muchos países por motivos ambientales han restringido esta fuente, con lo que no queda mas alternativa que el reciclaje. Hay otra vertiente del problema, también de carácter ambiental, que estriba en limitar la extracción de canteras de piedra natural (tal ha sido el caso de la cantera de basalto de la zona de Olot, Girona, España). En este sentido el Gremio de Áridos de Cataluña ha denunciado que solo hay reservas de áridos naturales para 10 años.

6.4.6. Otros residuos valorizables en hormigones

Siendo el hormigón una mezcla cuya composición es mas o menos variable, existe la posibilidad de incorporar un sin fin de residuos, siempre que se observen las reglas generales enumeradas en los párrafos anteriores. En el presente apartado se hace mención a algunos de ellos.

- *Hormigón residual.* Procedente de operaciones de deconstrucción una vez separado de sus armaduras y triturado (En Japón se ha analizado y concluido que el sistema de trituración y distribución granulométrica, es el parámetro más importante de cara a la valorización) se emplea como árido para la formulación del nuevo hormigón. En el Capítulo 14 de esta obra se trata extensamente.
- *Cascotes de ladrillo.* Si bien los restos de ladrillos rotos pueden ser reciclados en la propia industria cerámica, en algunos países se emplean como árido para la formulación de hormigones, con ello las cerámicas se evitan la compra de un molino para la valorización interna del cascote. Hay que tener en cuenta que en función del tipo de ladrillo del que se trate la capacidad de absorción de agua puede sobrepasar el 20%, lo que puede ser un inconveniente para la valorización en sustitución de grava convencional.
- *Cascotes de vidrio.* La primera parte del comentario es idéntica a la llevada a cabo en el párrafo anterior con la particularidad de que la capacidad de absorción de agua del vidrio es nula. De hecho esta aplicación se ha tenido que llevar a cabo cuando en alguna población se ha realizado la recogida selectiva de vidrio pero después no se ha podido separar por colores y el fabricante de vidrio rechaza la partida. Un comentario importante debe hacerse a esta valorización: no es conveniente emplear polvo de vidrio puesto que se trata de un reactivo alcalino y en contacto con el agua del hormigón puede disminuir la resistencia mecánica del mismo.
- *Escorias metalúrgicas.* Sobre todo si se hallan bien vitrificadas, y procedan de alto horno u horno eléctrico, no tienen problema alguno para su empleo como árido en la formulación de hormigones, en especial si se utilizan las fracciones granulométricas gruesas.

7. Residuos con propiedades puzolánicas

Las puzolanas naturales se han usado desde la antigüedad. Cuando se mezclan con cal da lugar a un material tan resistente como un cemento. Los antiguos romanos fueron afortunados en este tipo de materiales que tomaron el nombre por la cercanía a la localidad de Puzzuoli, cerca de Nápoles (Italia). Los romanos usaban un mortero de cal con puzolana, como en la actualidad se añaden a los cementos.

Las puzolanas naturales son rocas volcánicas procedentes de erupciones recientes, básicamente erupciones explosivas. Una violenta explosión volcánica emite magma fundido que al entrar en contacto con la atmósfera da lugar a una estructura amorfa (Como la ceniza del Vesubio que sepultó las ciudades de Herculano y Pompeya, muy próximas de la actual Nápoles, en el 79 adC).

En la actualidad se empela el término puzolana para referirse a los materiales que en contacto con la cal fraguan, endurecen y adquieren resistencia mecánica. Por tanto y en diferentes grados de actividad se deben clasificar como puzolanas las cenizas volcánicas (normalmente vítreas), el ópalo, los minerales de arcilla (caolinitas, illitas, montmorillonitas, vermiculitas, zeolitas, etc.) y los hidróxidos de aluminio. La Tabla 6.21 reproduce el análisis químico de unas cuantas puzolanas naturales.

Obviamente estas composiciones responden a la naturaleza de la roca magmánica de la que salieron. Desde el punto de vista mineralógico, las caracterizaciones indicadas corresponden a mezclas de feldespatos.

Existen otros tipos de puzolanas que tienen su origen en deposiciones de diversos materiales en presencia de agua que ha obligado a la lixiviación de los materiales orgánicos presentes, como es el caso de las diatomeas que pueden contener más de un 94% de sílice. La reacción puzolánica consiste en la capacidad de ciertos materiales de superficie específica muy elevada de reaccionar con el óxido, o hidróxido, de cal remanente procedente del cemento y formar fases cristalinas de notable resistencia como la gehlenita hidratada o diversos aluminosilicatos hidratados de cal.

Tabla 6.21. Caracterización de puzolanas naturales

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	PF
Bacoli (Nápoles)	53,8	18,2	4,3	9,0	1,2	3,0	7,6	0,6	3,1
Salone (Roma)	43,2	15,9	9,44	7,9	3,9	0,8	5,9	0,1	9,7
Santorin (Grecia)	63,8	13,0	5,7	4,0	2,0	3,8	2,5	0	4,8
Auvergne (Francia)	46,6	17,6	11,8	9,8	5,6	3,2	1,7	0,02	0,3
California (EE UU)	70,7	12,8	1,4	1,1	0,4	—	—	—	—
Tufa amarilla (Italia)	54,7	17,7	3,8	3,6	0,9	3,4	6,4	—	9,1

Una de las ventajas adicionales que aporta el empleo de puzolanas artificiales, residuos industriales, en la formulación de cementos es la disminución del calor de hidratación que en muchas ocasiones puede ocasionar defectos, fisuras y problemas mecánicos importantes. La norma EN 197(2) caracteriza los cementos con puzolanas naturales como CEM II/A-P y CEM II/B-P según que el contenido de puzolana natural oscile entre el 6 al 20% y el 21 al 35%.

7.1. ACTIVIDAD PUZOLÁNICA

Se define la actividad puzolánica de un material como la capacidad de fijar hidróxido cálcico a la temperatura ambiente en presencia de agua, originando productos sólidos, insolubles y con resistencia mecánica.

Se entiende por actividad hidráulica de un material la aptitud de dicho producto para endurecerse en presencia de agua o humedad. Esta propiedad la exhiben las cenizas volantes de alto contenido en cal (normalmente las procedentes de la quema de lignitos).

La denominada actividad puzolánica consta en realidad de una serie de reacciones complejas, alguna de las cuales no tiene una explicación bien conocida. En términos generales se trata de reacciones de solubilidad de vidrios, con caracterizaciones equivalentes a feldespatos o mezcla de ellos, en cal.

En la superficie de contacto, el agua destruye la estructura del silicato amorfo, dando lugar a que el calcio entre en la red vítrea y forme silicatos cálcicos hidratados insolubles. La liberación de un ión de sílice permite que se desencadene la reacción. Lógicamente las pozolanas que contengan más sílice unido débilmente a la estructura principal serán más reactivas. Lo mismo acontecerá con las puzolanas zeolíticas debido a su estructura abierta (gran cantidad de canales de penetración). La presión osmótica resultante de las diferentes concentraciones entre el interior y el exterior del retículo es la causante de la ruptura. En síntesis, el mecanismo sería:

$$\text{Puzolana } (SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, MgO, \text{etc.}) + CaO + H_2O \rightarrow \text{Silicatos alumínicos cálcicos hidratados (insolubles)}$$

La reactividad de la puzolana viene determinada por la caracterización química (silicatos amorfos) y el grado de finura. El ataque de los álcalis (cal) se produce sobre el retículo formando compuestos solubles. El ataque será mayor cuanto mayor sea el valor del pH. La presencia de alúmina suele ser beneficiosa para mejorar la resistencia. Desde el punto de vista de la composición las reacciones tienen lugar entre los siguientes grupos de óxidos:

- SiO_2, el formador de vidrio.
- Al_2O_3, el estabilizador de la red que, a la vez impide la desvitrificación (es decir, que se mantenga la estructura amorfa).
- Los óxidos fundentes, o básicos.

La Figura 6.27 indica el grado de fusibilidad que aportan los diversos óxidos a la fusión del vidrio. Si ahora se compara con la Tabla 6.21 se aprecia la influencia que ejercen los óxidos alcalinos sobre la fusibilidad. De todas maneras la gran tem-

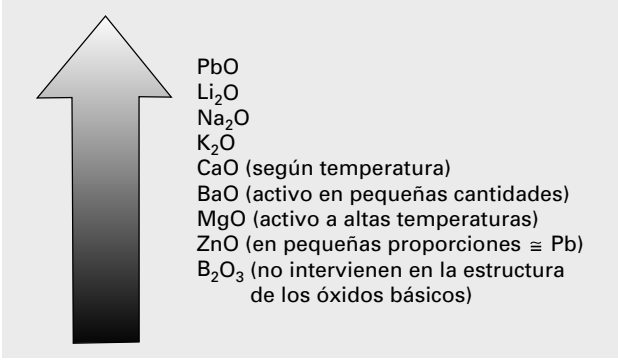


Figura 6.27. Fusibilidad de los óxidos fundentes de las puzolanas.

peratura reinante en el magma hace fundir casi cualquier composición. No obstante lo importante es saber que una composición rica en fundentes es más propensa al ataque (lixiviación), es decir a la reactividad.

Como muestra la figura precedente, después del PbO los álcalis proporcionan el flujo más fundente y su orden de reaccionabilidad es Li, Na y K. Los vidrios con mucha presencia de álcalis son propensos a la inestabilidad, en este caso el cuarteo, a no ser que se aumente el SiO_2. Los vidrios en los que predominan los álcalis no son muy resistentes al ataque de ácidos y bases.

Los alcalinotérreos, básicamente el CaO, pueden sustituir paulatinamente a los álcalis a medida que la temperatura de formación es mayor. Posee una mejor resistencia al cuarteo que el PbO y los álcalis y contribuye a aumentar la resistencia al ataque de los ácidos. El óxido de magnesio es menos activo que los otros alcalinotérreos y proporciona buena resistencia a los ácidos sin llegar a los valores del CaO o ZnO.

El óxido de zinc presenta una fusibilidad similar a la del plomo, en muy pequeñas proporciones. En mayores cantidades disminuye la fusibilidad. Proporciona una excelente resistencia al ataque de ácidos. El óxido de boro reduce el punto de fusión de un vidrio y hace que la fusión sea menos viscosa sin detrimento de otras cualidades.

Siguiendo el estudio de Seger (físico y ceramista alemán del siglo XIX), para estudiar la sistemática de comportamiento de los vidrios formados a partir de diversos minerales a su vez compuestos por óxidos, la composición en mols debe ser: óxidos fundentes 1, anfóteros y formadores de vidrio variables. Esta relación es muy amplia, como indica la Figura 6.28.

A igualdad de temperatura de formación y de composición de óxidos fundentes (valor molar 1), la Figura 6.28 se debe interpretar en los siguientes términos: si la relación SiO_2/Al_2O_3 vale 1,25 (punto A) la roca no habrá fundido. Si la relación SiO_2/Al_2O_3 vale 5,3 (punto B) el vidrio obtenido es muy brillante. En términos puzolánicos esto significa que los enlaces son débiles y fácilmente lixiviable, es decir se tratará de una puzolana activa. Finalmente una relación SiO_2/Al_2O_3 de 20 (punto C) durante el enfriamiento el vidrio recristalizará (desvitrificará) los cristales prevalecerán sobre el vidrio y la puzolana será poco reactiva. Los cristales siempre son mucho más resistentes que el vidrio del que proceden.

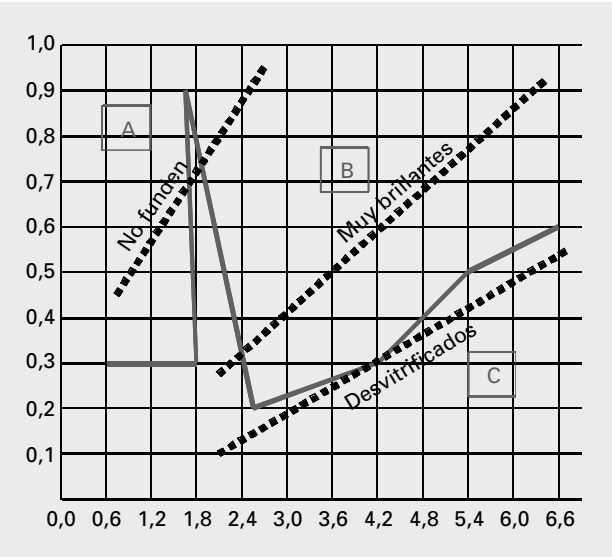


Figura 6.28. Zonas de formulación de vidrios según la relación SiO_2/Al_2O_3.

Las cantidades de cal a añadir a la puzolana depende de la caracterización de ésta pero suele oscilar de 1 parte de cal por 5, o más, de puzolana. En síntesis, en el proceso puzolánico el desencadenante de las reacciones es la cal con agua, que provoca la rotura de la puzolana. A partir de este momento se forman una serie de silicatos aluminícos cálcicos, como la gehlenita, la etringita, etc., insolubles y de gran resistencia mecánica. La reacción puzolánica también se presenta en las mezclas cemento portland y puzolana.

Con los antecedentes explicados se comprende que existen muchos materiales naturales y también residuales aptos para usarlos por desarrollar propiedades puzolánicas de forma natural o provocándolas.

7.2. EMPLEO DE RESIDUOS DE BAUXITA COMO PUZOLANAS ARTIFICIALES

Calcinar arcillas para obtener propiedades puzolánicas puede resultar caro pero se pueden usar bauxitas residuales para este cometido. La parte superior de la Figura 6.29 muestra el termograma (análisis térmico diferencial) de un residuo de bauxita. El pico endotérmico de 350 ℃ se debe a la deshidratación de la gibsita y la geotita, mientras que el de 516 ℃ corresponde a la caolinita. A partir de esta temperatura el retículo cristalino se rompe y la «meta-arcilla» es muy activa.

La reactividad del residuo calcinado depende de su naturaleza amorfa. Así, la parte inferior de la Figura 6.29 muestra la resistencia de la mezcla de cal

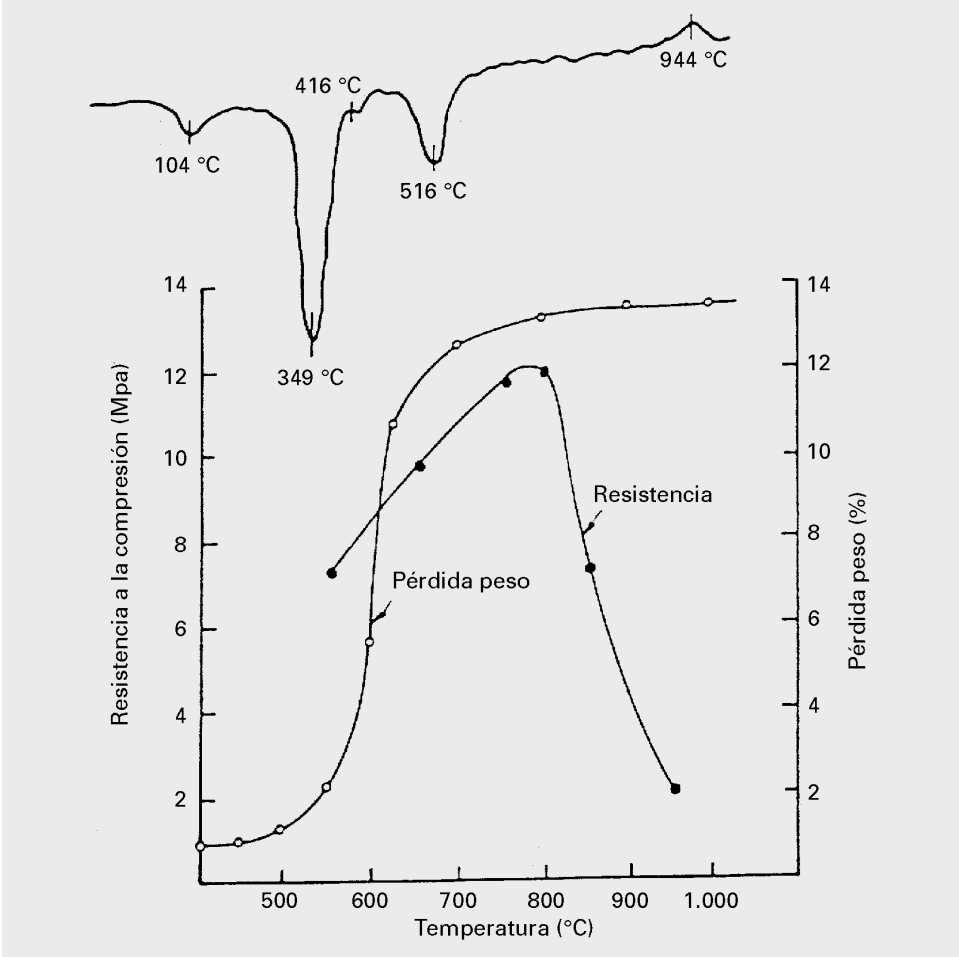


Figura 6.29. Termogramas de un residuo de arcilla.

con la bauxita calcinada a diversas temperaturas. Se observa que el máximo de resistencia se obtiene sobre los 750 ℃, donde no se ha iniciado la formación de fase vítrea. Además si el tiempo de residencia a dicha temperatura es corto no existe recristalización y la puzolanidad es máxima.

7.2.1. Puzolanidad de los minerales de arcilla

Las tierras calcinadas o los cascotes (artículos de arcilla cocida rotos) se han usado desde la Antigüedad por sus propiedades puzolánicas. Cuando se calcinan arcillas naturales por encima de su temperatura de deshidratación, que según el mineral de arcilla presente pueden oscilar entre los 600 y 750 ℃, se obtiene una «meta-arcilla» (retículo desordenado) con una elevada superficie específica y una gran reactividad. Estas son las propiedades que se usan para la puzolanidad. Las puzolanas obtenidas por calcinación de arcillas naturales se asemejan mucho a las puzolanas naturales cuando se les pone en contacto con la cal.

Los minerales que conforman las rocas arcillosas están formados por diferentes átomos y moléculas. Estos minerales, derivados de las rocas aparecen en diferentes estados de evolución dependiendo de cómo les ha afectado el proceso de alteración, transporte y sedimentación. Su naturaleza también dependerá del tipo de roca madre. Pero a pesar de su aparente diversidad de combinaciones, la abundancia de nueve elementos en la corteza terrestre la limita bastante. La Tabla 6.22 lista estos nueve elementos, su porcentaje en rocas y suelos.

La alófana es un término genérico que se usa para describir materiales silicoaluminosos altamente desordenados o amorfos. La difracción de rayos X no tiene suficiente resolución para identificar estos compuestos como cuerpos cristalinos, de ahí que se denominen criptocristalinos. Las especies más representativas son la citada alófana y la imogolita (neosilicato criptocristalino), identificadas por primera vez en suelos desarrollados a partir de cenizas volcánicas.

Tabla 6.22. Abundancia de elementos químicos en rocas y suelos

Elemento (símbolo)	Peso (%) en rocas	Peso (%) en suelos
Aluminio (Al)	8,23	7,2
Calcio (Ca)	4,14	2,4
Hierro (Fe)	5,63	2,6
Magnesio (Mg)	2,33	0,9
Oxígeno (O)	46,40	49,0
Potasio (K)	2,09	1,5
Silicio (Si)	28,15	31,0
Sodio (Na)	2,36	1,2
TOTAL	99,33	95,8

Desde el punto de vista de la puzolanidad, este mineral es de gran valor debido a la elevada superficie específica. La composición química es muy variable, pudiendo considerarla más como una serie de minerales, solución sólida de sílice, alúmina y agua, que como una especie mineral especifica. Los términos extremos de la serie vienen caracterizados por ratios Si/Al de 1/1 y 1/2 respectivamente. En todos ellos predominan los enlaces Si-O-Al.

La Tabla 6.23 reproduce la fórmula química teórica de los minerales de arcilla mas importantes desde el punto de vista de la puzolanidad. Hay que añadir que es raro encontrar una materia prima que contenga tan solo un mineral de los indicados en la tabla, lo habitual es que una arcilla este compuesta de una mezcla de estos minerales, a los que, además hay que añadir, casi siempre, el cuarzo.

Tabla 6.23. Fórmulas químicas de los principales minerales de arcilla

Mineral	Fórmula química teórica
Caolinita	$Al_2[Si_2O_5](OH)_4$
Halloysita	$Al_2SiO_3(OH)_4$ y $Al_2SiO_3(OH)_4 \cdot 2H_2O$
Moscovita	$KAl \cdot 2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$
Montmorillonita	$\frac{1}{2}$ $(Ca, Na)_{0\text{-}7}$ $(Al, Mg, Fe)_4$ $[(Si, Al)_8O_{20}]$ $(0H)_4 \cdot nH_2O$
Clorita	$(Mg, Fe)_3(Si,Al)_4O_{10} \cdot (OH)_2 \cdot (Mg, Fe)_3(OH)_4$

La superficie específica afecta tanto a la puzolanidad de los minerales de arcilla como a la capacidad de adsorción de agua. A mayor superficie especifica mayor grado de reaccionabilidad. El otro factor, ya citado, es la composición química.

En Cuba, donde existen grandes depósitos de tobas de origen volcánico zeolitizadas, se ha probado con éxito la sustitución de un 20% de cemento por la adición de zeolitas de origen volcánico (la meteorización de vidrio volcánico puede producir zeolitas) finamente molidas.

Tabla 6.24. Tipo de mineral versus superficie específica

Tipo de mineral	Superficie específica (m^2/g)
Arena gruesa	0,01
Arena fina	0,1
Limo	1,0
Caolinita, zeolitas	5-100
Illita	100-200
Vermiculita y minerales de capa mixta	300-500
Montmorillonita	700-800

Otro caso representativo son los depósitos de material volcánico situados al sur de la isla de Tenerife (España), donde hay formaciones de plagioclasa (mezcla isomórfica de feldespatos) con analcima (zeolita sódica), cuya composición aparece en la Tabla 6.25.

Algunas especies de zeolitas tienen propiedades de tamiz molecular, en particular la mordenita y la clinoptilotita, que se usan para separar los gases que componen el aire.

7.3. PROPIEDADES PUZOLÁNICAS DE RESIDUOS DE LA INDUSTRIA AZUCARERA

Los residuos agrícolas e industriales procedentes de la industria azucarera: las Cenizas del Bagazo de Caña (CBC) y las Cenizas de Paja de Caña (CPC) tienen actividad puzolánica derivada de alta cantidad de SiO_2 que contienen. La Tabla 6.26 muestra los análisis químicos de ambos tipos de cenizas.

Tabla 6.25. Composición química de puzolanas de Canarias

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	PF
Muestra 1	57,2	16,7	3,1	1,1	2,3	1,1	7,2	4,7	3,6
Muestra 2	56,8	16,7	2,0	0,5	0,7	1,2	6,7	5,5	7,5

Tabla 6.26. Composición química de cenizas de bagazo

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	P_2O_5	PF
CBC	72,4	5,3	3,9	0,3	8,0	2,8	0,8	3,5	0,1	1,6	0,8
CPC	59,1	4,7	3,2	0,3	19,6	2,3	0,7	4,7	1,4	1,7	2,0

Cuando se lleva a cabo la valorización energética de estos residuos, las temperaturas de combustión son elevadas pero, las que afectan a las cenizas oscilan entre 500 y 800 ℃, temperaturas adecuadas para evitar la recristalización de la sílice amorfa presente en ciertos vegetales. En el momento que se forman fases cristalinas (cristobalita, cuarzo o tridimita) se pierde la reactividad. Para lograr temperaturas moderadas hay que usar un combustor de lecho fluidizado. Por lo general en los ingenios (fábricas de azúcar) la humedad de estos residuos es del 50%, característica que ayuda a mantener la temperatura dentro de los valores deseados. Las cenizas que son mayoritariamente amorfas tienen actividad puzolánica cuando se las mezcla con un 25-30% de cal.

En Cuba, donde la cantidad de caña de azúcar es importante se han desarrollado hornos incineradores destinados a reducir la cantidad de residuos e intentar recuperar la microsílice, como el mostrado en la Figura 6.30.

El diseño se distingue porque la biomasa esta físicamente separada de la parrilla a alta temperatura. El tiro no es muy importante de manera que no arrastre con los gases las cenizas volantes. Si la velocidad de los gases es inferior a la de sedimentación de las cenizas, éstas se recogen sin necesidad de tener que esperar que el horno se pare. El resto de aire (aire secundario) se introduce en la parte superior para evitar la formación de coque.

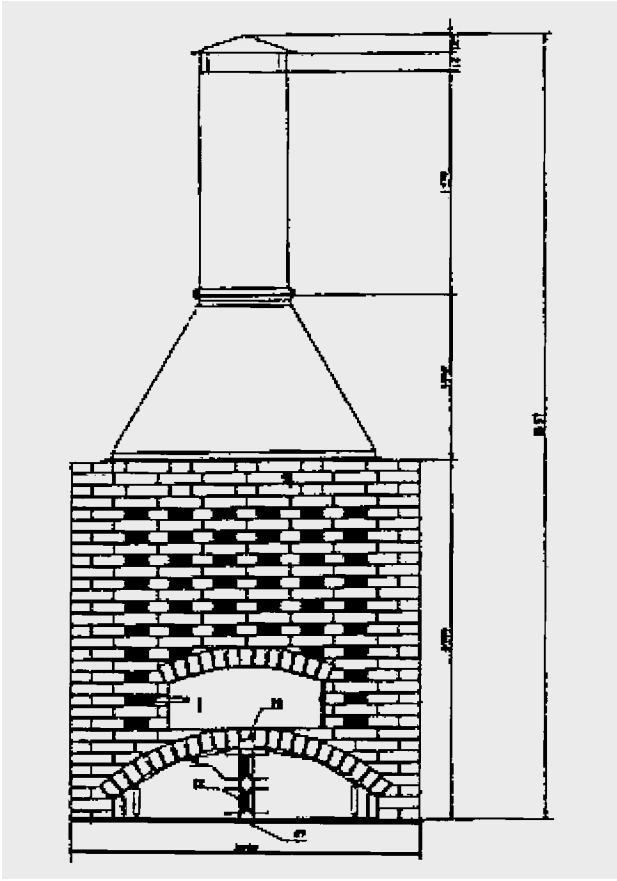


Figura 6.30. Esquema de un horno para recuperar material puzolánico del bagazo.

7.4. ESCORIAS METÁLICAS COMO MATERIAL PUZOLÁNICO

Las escorias metalúrgicas, en particular las procedentes de los altos hornos se han venido usando para la formulación de cementos debido a sus propiedades hidráulicas, bajo calor de hidratación y sobre todo la gran resistencia que proporcionan a los hormigones frente a la agresión de los sulfatos, el agua de mar y la propia agua pura. La Tabla 6.27 muestra análisis químicos típicos de diferentes escorias.

Tabla 6.27. Composición química de escorias metalúrgicas

Escorias	SiO_2	Al_2O_3 + FeO	CaO	MgO	MnO	CaO/SiO_2
Alto horno	33	14	40	8	0,5	1,2
Escoria LD (Linz-Donawitz)	13	1	47	1	31	3,6
Pb/Zn	18	6	20	1	38	1,1
Ni	29	1	4	2	30	0,1
Cu	34	44	9	4	2	0,3

En el caso de los altos hornos, la temperatura de trabajo que oscila entre 1.400 y 1.600 ℃ provoca la fusión de componentes que en el enfriamiento (directamente en agua) se tornan vidrios del sistema CaO-SiO_2-Al_2O_3-MgO, o más fácilmente C-S-A con una cantidad constante de MgO, tal como muestra el diagrama ternario de la Figura 6.31.

Las escorias fritadas (enfriadas directamente en agua) tienen propiedades hidráulicas una vez se han triturado finamente. Para desarrollar la propiedad puzolánica, las escorias deben activarse químicamente y ello se lleva a cabo con sosa cáustica, cal, carbonato de sodio, silicato sódico, sulfato cálcico o fosfoyeso.

La cantidad de escoria de alto horno empleada para fabricar cementos es variable de un país a otro. Por ejemplo, en Francia las cantidades son:

- Premezclar con cemento portland: escoria $\leq$ 35% (en peso).
- Cemento de escoria de alto horno: 60 $\leq$ escoria $\leq$ 70%
- Clínquer de escoria: escoria $\geq$ 80%

Es de resaltar el ahorro energético que suponen estas sustituciones. Así el consumo específico para la fabricación de cemento portland es de 3.500 kJ/t y necesita del orden de 1,5 t de materias primas. Mientras que una tonelada de cemento de alto horno, que contiene un 65% de escoria (con una humedad del 15%) necesita solo 0,5 t de materias primas y presenta un consumo energético de 1.650 kJ/t.

7.4.1. Cemento de escorias

La escoria de alto horno, una vez enfriada, se homogeniza y almacena. Seguidamente se seca para ser enviada a la fábrica de cemento. Por otro lado se fabrica el clínquer por el sistema convencional. Al final se mezclan los siguientes ingredientes:

- Escoria de alto horno.
- Clínquer.
- Yeso.

La cantidad de escoria, que puede llegar al 70%, a añadir al cemento dependerá de la reactividad de la misma. A su vez, esta característica es dependiente de la distribución granulométrica. La finura Blaine de la escoria debe ser superior a 400 m^2/kg. Otro factor que contribuye a su baja porosidad es la reducida cantidad de agua que precisa en la hidratación, lo que minimiza la contracción y, lógicamente la porosidad.

La propiedad más sobresaliente de los cementos de escorias es su resistencia a las agresiones de los sulfatos, agua de mar, agua termal, agua carbonatada, etc. Los cementos de escoria que contienen más de un 65% de escorias son casi inmunes a ión Cl^-, debido a que su porosidad abierta es unos 30% inferiores a los cementos portland convencionales y, a la vez la porosidad esta ligada con el tamaño de poro. Es el tipo de cemento que suele emplearse para la fabricación de hormigones en el mar: por ejemplo, en la construcción de centrales eléctricas maremotrices.

Por la misma razón de la reducida porosidad el cemento de escoria es altamente resistente al hielo. Sabido es que los materiales de construcción con una porosidad reducida, al llover el agua penetra difícilmente en el interior del poro (el agua fría es más viscosa que la templada) además la pequeña cantidad que penetra no tiene fuerza suficiente para provocar daños cuando hiela (el agua al pasar de fase líquida a sólida aumenta de volumen).

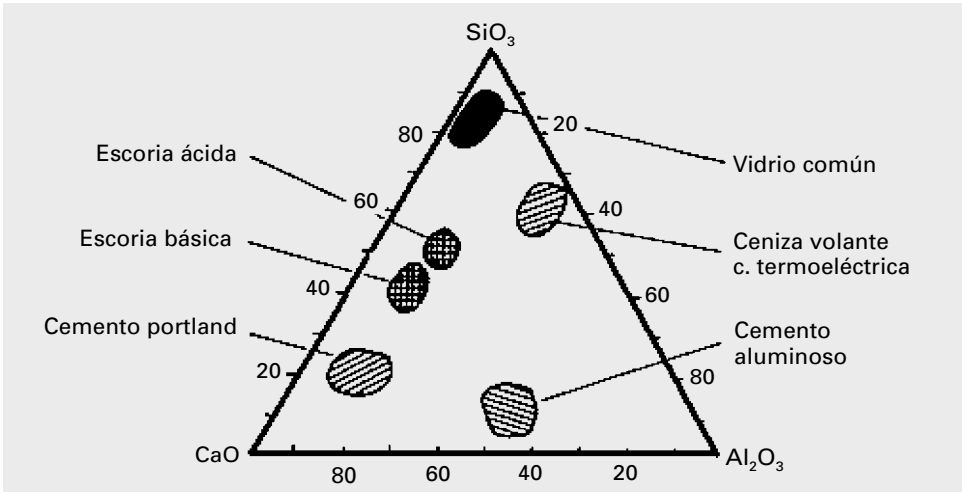


Figura 6.31. Diagrama ternario del sistema CaO-SiO_2-Al_2O_3.

La resistencia a los agentes químicos hace que este tipo de cemento se emplee para la fabricación de tuberías para conducción de aguas residuales, donde los procesos anaerobios dan lugar a la generación de H_2S que termina por destruir la conducción.

7.4.2. Morteros de escorias activadas y reforzados

Los cementos de escoria activada alcalinamente (AAS) tienen el problema en su elevada retracción en secado. Para evitar este efecto científicos del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC) en Madrid, España, estudiaron el comportamiento de morteros de escoria activada alcalinamente reforzados con fibras de vidrio álcali-resistentes (AR) especialmente diseñadas para reducir la contracción en secado en sistema cementantes.

Los cementos y hormigones alcalinos se obtienen por la mezcla de una disolución fuertemente alcalina y un material que puede ser natural, como las arcillas, o artificial, como las escorias de alto horno o cenizas volantes silicoaluminosas. Estos cementos tienen la ventaja adicional de que, al emplear mejoras tecnológicas e incluir residuos como sustitutos parciales de combustibles y materias primas, son de una alta eficiencia energética y su proceso de fabricación es de baja contaminación.

Los cementos de escorias activadas alcalinamente pueden desarrollar unas resistencias comparables a las del cemento Pórtland, alcanzando resistencias a la compresión de 30 a 40 MPa a las 24 horas; pero cuando el activador es un silicato sódico, desarrollan unas retracciones en secado hasta cuatro veces superiores a los correspondientes de cemento Portland. Esta desventaja tecnológica afecta mucho a sus posibilidades de aplicación a nivel comercial.

Como alternativa, la incorporación de fibras de vidrio AR, en un contenido cercano al 0,22% en peso de ligante, en morteros de escoria activada alcalinamente reduce la retracción al secado en un 20%.

7.4.3. Cementos compuestos elaborados con puzolana natural y escoria granulada de alto horno

Debido a exigencias del mercado y de la producción de cemento Portland es cada vez más frecuente la elaboración de «cementos a medida» con dos o más adiciones a partir de la molienda separada de sus constituyentes. Cuando el contenido de adiciones es alto, la utilización de puzolana y escoria en este tipo de cementos presenta la particularidad de disminuir la resistencia inicial del cemento resultante; sin embargo, si alguna o ambas adiciones se activan, este problema puede minimizarse.

En el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional del Centro, Argentina, se han realizado investigaciones donde analizaron la influencia de la incorporación al cemento Pórtland de puzolana natural (hasta un 20%) y escoria granulada (hasta 35%) sobre la resistencia a flexión y compresión de morteros.

La activación física de la puzolana natural mejora la resistencia a edades tempranas del cemento ternario, mientras que la acción conjunta de puzolana natural y escoria granulada contribuye a mejorar la resistencia a edades más avanzadas. Por otra parte, la utilización de cementos compuestos por una combinación de cemento Portland y dos adiciones significa un empleo más racional de los recursos naturales sin comprometer la resistencia a compresión o flexión del mortero.

7.4.4. Escorias de ferroaleaciones

Las escorias procedentes de la fabricación del acero pueden llegar a representar hasta un 20% en peso de la materia prima ingresada. Este es el caso de la fabricación de ferroaleaciones de silicio/manganeso, escorias SiMn. Una de las vías de posible valorización es la industria cementera atendiendo a la cantidad producida ya que, solo en España, la cantidad se puede cifrar en 150.000 toneladas al año.

La escoria de SiMn se diferencia de la siderúrgica usada en la industria cementera por la cantidad de Mn. La gran presencia de manganeso puede afectar a la hidraulicidad. Se han efectuado ensayos a base de moler la escoria SiMn hasta una finura Blaine de 4.500 cm^2/g. La Tabla 6.28 reproduce una composición química estándar.

Mineralógicamente, la principal especie es la akermanita (silicato cálcico-magnésico), diversos feldespatoides, óxido de manganeso y sulfuros de manganeso y de potasio.

Los ensayos de puzolanidad indican que el comportamiento de la escoria de SiMn está a medio camino entre el humo de sílice y la ceniza volante de central termoeléctrica. Los cementos de escorias de SiMn, en proporciones entre el 5 y el 15%, cumplen las normas exigidas para el empleo de escorias en ce-

Tabla 6.28. Composición química de la escoria de ferroaleación

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	MnO
Escoria SiMn	42,6	12,2	1,0	0,4	25,2	4,2	0,4	2,2	0,4	10,0

mentos, especialmente en lo concerniente al contenido de sulfatos y cloruros. Es de resaltar que los cementos con escorias de SiMn requieren menor cantidad de agua para el fraguado.

7.5. PROPIEDADES PUZOLÁNICAS DE LA SÍLICE RESIDUAL

La sílice (SiO_2) condensada es un residuo común en los hornos eléctricos usados en la fabricación de silicio metal, aleaciones de silicio o carburo de silicio. A las temperaturas de trabajo parte del silicio metálico, o en forma de monóxido de silicio, se volatiliza y se oxida, con lo que el polvo emitido puede contener más del 80% de sílice amorfa (el resto suelen ser óxidos de hierro y óxidos de metales alcalinos y alcalino-térreos) de tamaño de grano extremadamente pequeño (menor de 0,1 mm) y posee una alta puzolanidad.

Se trata de un subproducto excelente para añadir a los hormigones de cemento portland. Su adición reduce el choque térmico causado por el calor generado durante la hidratación del cemento. La Tabla 6.29 indica los rangos de SiO_2 que suelen ser comunes en diversas CSF (*condensed silica fume*).

La sílice CSF procedente de las fundiciones de ferroaleaciones, es de características similares a las demás sílices amorfas pero es un residuo típico procedente de la fabricación de las aleaciones de ferrosilicio. Habida cuenta que muchas fábricas generan más de un millón de toneladas de CSF al año, es interesante valorar sus propiedades puzolánicas ya que sus consecuencias técnicas, económicas y ecológicas son muy importantes.

La valorización puede llevarse a cabo a base de añadir el CSF al cemento o bien al hormigón durante su preparación. El resultado final es muy parecido.

La Figura 6.32 muestra la recogida de la sílice en el filtro de mangas. Su peso específico oscila de 200 a 250 kg/m^3, lo que origina dificultades de manipulación. Una vez densificado y peletizado puede llegar a los 500 kg/m^3. Además hay que tener presente que

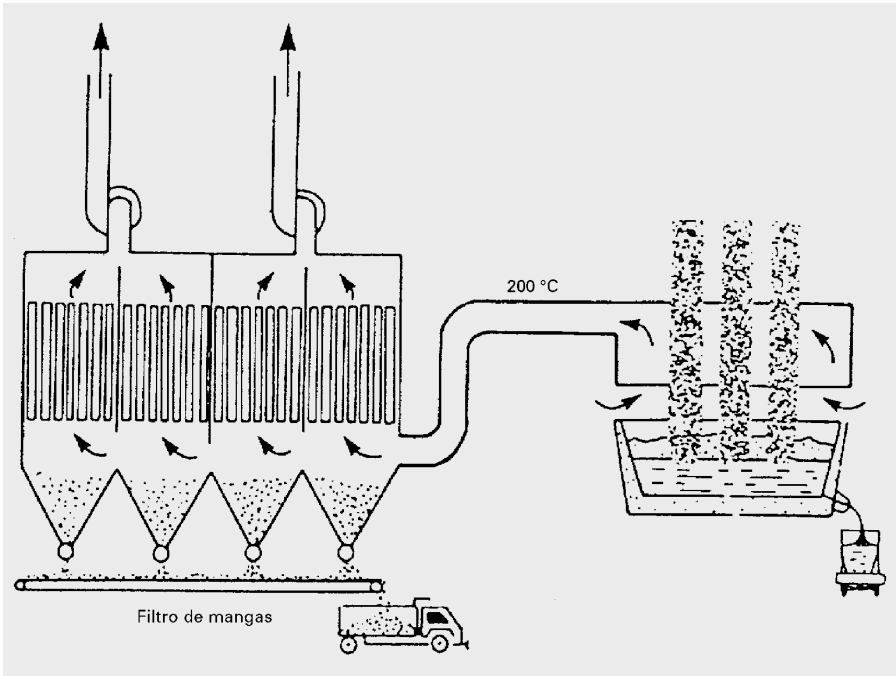


Figura 6.32. Captación de sílice en una fábrica de ferroaleación.

Tabla 6.29. Composición química de algunas SCF

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	C	PF
Fabricación Si	94	0	0	0	0,5	1,1	0	0	0,2	1,0	2,5
FeSi (75%)	89	0,4	0,6	0	0,2	1,7	0,2	1,2	0,1	1,4	2,7
FeCrSi	83	2,5	1,0	0,2	0,8	7,0	1,0	1,8		1,6	2,2
CaSi	54	0,9	0,7	0	23,2	3,3	0,66	2,4		3,4	7,9
SiMn	25	2,5	1,8	36	4,0	2,7	2,0	8,5	2,5	2,5	10

los tamaños de partícula tan pequeños pueden ser inhalados en las fábricas y producir fibrosis pulmonares.

Dosificaciones de CSF de un 15% pueden aumentar la resistencia mecánica de un hormigón en más de un 50%.

8. Uso de cenizas volantes

Las cenizas volantes son un residuo abundantísimo de las centrales termoeléctricas que consumen carbón en sus diversas variedades: antracita, hulla o lignito. Con referencia a la generación el residuo, entre cenizas volantes (son las arrastradas por los gases) y cenizas de hogar (por ser de mayor tamaño caen al fondo del hogar), puede oscilar del 5 al 50%, con respecto a la materia prima ingresada. La norma ENE 83-415-87 las define como «Producto sólido y en estado de fina división procedente de carbón pulverizado en los hogares de centrales termoeléctricas y que es arrastrado por lo gases del proceso y recuperado de los mismos en los filtros».

La norma UNE-ENV 197-1, divide las cenizas volantes en silíceas (V) y cálcicas (W). Mientras que la estadounidense ASTM C618-84 establece la siguiente clasificación:

- *Clase F:* producidas por calcinación de carbón bituminoso o antracita, con contenido mínimo de $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ del 70%.
- *Clase C:* producidas por calcinación de carbón subbituminoso o lignito, con contenido mínimo de $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ del 50%. Estas cenizas poseen propiedades cementantes ya que tienen un contenido de cal superior al 10%.

La temperatura de combustión influye de manera directa en las características y propiedades de las partículas sólidas suspendidas en el flujo gaseoso. A 1.000 °C una parte de los minerales se transforman pero a partir de los 1.400 °C, la inmensa mayoría funde. Según la temperatura, los minerales que acompañan al carbón sufren diversas transformaciones fisicoquímicas: unos se deshidratan (como los yesos), los carbonatos se descomponen, los sulfuros se oxidan y, la mayor parte funde.

Su composición química depende, básicamente, de la naturaleza del carbón usado. Los carbones naturales suelen estar asociados a restos de la roca madre que sirvió de lecho durante su formación. Por tanto cuando se extrae el carbón también se incorpora una cantidad de material inorgánico procedente de la roca originaria. Según la naturaleza de la roca los elementos contaminantes o impropios serán diversos. Ello explica la gran cantidad de variedades en la caracterización de cenizas volantes. En cualquier caso la presencia de SiO_2 está asegurada, puesto que este componente es el origen de todos los silicatos o mineral omnipresente en la mayoría de las rocas. Además el SiO_2 es también el formador de vidrio por excelencia, de ahí que esta composición junto con la elevada temperatura que se desarrolla en los hogares de las calderas, dé lugar a la formación de estructuras de naturaleza básicamente amorfa.

Desde el punto de vista fisicoquímico su estructura es, esencialmente vítrea debido a las altas temperaturas a las que se ha generado. En realidad se trata de un polvo finísimo con un tamaño de grano máximo del orden de las 45 mm, lo que le proporciona una superficie específica de 3.000 cm^2/g. La Figura 6.33 muestra una fotografía de las cenizas volantes vistas al microscopio electrónico.

Debido a su naturaleza y a su gran superficie especifica se las denominan también puzolanas artificiales, ya que al activarlas con lechada de cal y agua

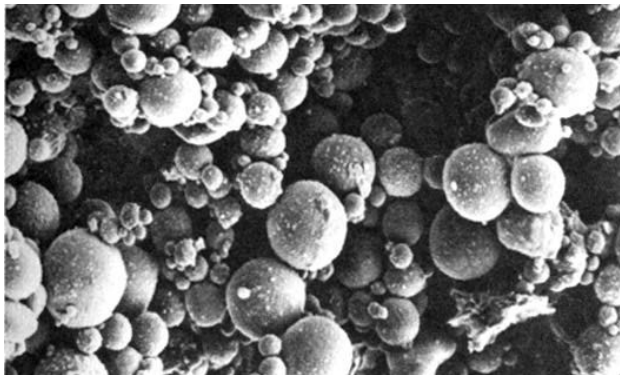


Figura 6.33. Microfotografía de cenizas volantes de carbón.

tiene lugar la reacción puzolánica que da lugar a un producto estable:

$$\text{Ceniza Volante} + Ca(OH)_2 + H_2O \rightarrow \text{Producto Estabilizado}$$

Esta importante propiedad se utiliza para adicionar cenizas volantes a la composición de un hormigón estructural de cemento portland. Hoy en día se formulan hormigones que en su composición hay tanta ceniza volante como cemento. En 1997 las centrales térmicas de carbón es España produjeron más de 8 millones de toneladas de cenizas volantes. En este mismo año el grado de valorización fue del 40%, los consumos mayoritarios fueron para la fabricación de cemento (13,6%), hormigones (12%) y terraplenes y rellenos (8,6%), las otras aplicaciones, hasta el 40%, representaron cantidades menores.

8.1. CARACTERÍSTICAS DE LAS CENIZAS VOLANTES DE CENTRALES TERMOELÉCTRICAS

Como se ha indicado en la introducción, la caracterización de las cenizas dependerá de la mineralogía de los minerales que acompañen al carbón y al proceso térmico a que se encuentren sometidas, básicamente el binomio temperatura-tiempo. Las características dependen de:

- *Cantidad de carbón.* Este parámetro es consecuencia de la forma en que el carbón es alimentado (distribución granulométrica) y al sistema de combustión. Por lo general su cantidad no supera el 5%. Su presencia es perjudicial para las aplicaciones al hormigón.
- *Composición química y mineralógica.* Ello es función de los minerales asociados al carbón. La norma ASTM C-618, limita la cantidad mínima de $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ a 50% para las cenizas altas en cal (más del 10%) y de un 70% para las cenizas bajas en cal.
- *El contenido en vidrio.* Por lo general, el 70% (puede llegar al 90%) es vidrio pero la proporción, además de la mineralogía, depende de la velocidad de enfriamiento. A mayor cantidad de vidrio, mejor comportamiento hidráulico.
- *Distribución granulométrica* (es una propiedad muy dependiente de la trituración del carbón) y por lo general varia de 200 a 1 mm. La superficie especifica oscila de 150 a 250 m^2/kg (si son recogidas en ciclones, mientras que las recolectadas en filtros electrostáticos superan los 400 m^2/kg, obteniéndose valores de hasta 12.000 m^2/kg.).
- *Morfología*. Las cenizas están formadas por múltiples partículas de diferente tamaño, textura y forma. Abundan las esferas (cenosferas), compactas o huecas, lisas o rugosas, que en ocasiones albergan en su interior otras esferas más pequeñas (plerosferas). En la superficie se aprecian depósitos, cristalizaciones y sales, con frecuencia solubles.

La Tabla 6.30 reproduce el análisis químico de una serie de cenizas volantes españolas, que son semejantes a las producidas en otros países. Los elementos más abundantes son Si, Al y Fe, seguidos de Ca, Mg, S, álcalis y Ti.

Además contienen, como elementos minoritarios, metales como Mn, Sr, Ba, V, Li, Ga, P, Ni, Zn, As, Pb, Ge, Mo, etc. La clasificación de las cenizas se establece como silicoaluminosas, sulfocálcicas y silicocalcáreas. El investigador Metha, en 1983, propuso clasificarlas en dos grupos: bajas en cal (menos del 10%) y altas en cal, por la razón de que las propiedades hidráulicas tienen a ver con la cantidad de cal y la forma en que este compuesto se halla en las cenizas.

La composición mineralógica es, como se ha indicado, consecuencia de la composición química y de la historia térmica. Así, la Tabla 6.31 muestra la estructura de la ceniza volante de la central de Los Barrios (Cádiz).

La mullita es un mineral típico de recristalización, es decir que se forma a partir de un vidrio. Algo semejante acontece con los feldespatos. En cambio, el cuarzo, como la anhidrita y el óxido de cal son minerales muy refractarios y probablemente ya estaban en esta forma cuando entraron con el carbón. La magnetita proviene de la reducción del hematites (óxido de hierro).

Tabla 6.30. Composición química de algunas cenizas volantes

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3
Aboño	47,0	31,0	11,0	4,4	0,5	4,3	4,3	0,5
Andorra (Teruel)	47,5	24,6	18,6	3,5	1,0	0,4	2,5	0,4
Carboneras	42,5	31,1	3,7	7,0	1,9	0,2	0,7	0,1
Cercs	40,1	17,1	8,9	26,3	0,9	0,3	1,2	4,5
Compostilla	51,1	27,5	6,8	2,6	2,2	1,1	2,9	2,3
Escatrón	36,6	9,0	5,1	33,7	1,6	0,7	1,7	9,3
Escucha	62,2	23,2	9,8	1,3	1,0	—	—	3,3
Los Barrios	50,5	30,1	5,0	5,3	1,2	0,7	1,1	0,7
Narcea	57,0	23,0	6,2	3,5	2,5	2,7	2,8	0,2
Puente Nuevo	53,6	30,7	7,1	1,4	1,7	0,5	4,7	0,8
Puentes García Rodríguez	46,0	32,0	9,5	4,9	1,5	0,4	2,0	2,0
Puertollano	62,2	26,0	6,9	0,9	0,9	0,2	2,2	0,3

Tabla 6.31. Composición mineralógica de una ceniza volante

Especie mineral	% en peso
Mullita	20,8
Cuarzo	4,5
Anhidrita	1,3
Calcita	< 0,1
Óxido de cal	4,1
Magnetita	0,5
Feldespatos	2,5
Fase vítrea	66,4

8.1.1. Reactividad de las cenizas volantes

La principal propiedad de las cenizas volantes es que son reactivas y ello permite que sean valorizadas para muchas clases de materiales de construcción. El tipo de reactividad depende de las propias cenizas, en particular las que poseen mayor cantidad de cal.

Las cenizas volantes tienen propiedades puzolánicas, debido a su capacidad de reaccionar con la cal a temperatura ambiente y en presencia de agua para formar compuestos insolubles y estables, que endurecen con agua. Las cenizas con alto contenido en cal tienen también propiedades hidráulicas.

Las cenizas volantes necesitan de un periodo de tiempo más o menos largo para manifestar su reactividad puzolánica. De hecho, la velocidad de fijación de la cal es inferior a la de las puzolanas naturales. Según muestra la Figura 6.34, cuando a un hormigón se le añade una cantidad de ceniza volante su resistencia, pasados los 28 días, se incrementa con independencia de la proporción de la mezcla.

La duración del periodo de inactividad depende, fundamentalmente, de:

- Cantidad de finos en las cenizas. A mayor cantidad de finos, menor tiempo.
- Porcentaje y caracterización de la fase amorfa. A mayor cantidad de vidrio, menor periodo de inactividad.
- Nivel de alcalinidad de la fase acuosa que debe rellenar los poros de la pasta.

El proceso global de la reacción puzolánica se puede comparar al que se produce en la hidratación del cemento portland, esto es disolución en medio acuoso de sus partículas y precipitación posterior de nuevos compuestos hidratados con endurecimiento del material. En el caso de las cenizas, la reactividad es una función del contenido de sulfatos y la fase vítrea, que proporcionan la capacidad de reacción con la cal y los álcalis liberados fácilmente solubles.

8.2. CONTRIBUCIÓN DE LAS CENIZAS VOLANTES A LAS CARACTERÍSTICAS DEL HORMIGÓN

La aplicación de cenizas volantes a los cementos tiene más de un siglo de experiencia. La normativa española ENE 80 301, distingue las siguientes variedades;

- *Cemento portland compuesto, tipo II.* En él se admite la adición de cenizas volantes entre 6 y 23% junto con puzolana natural, y 65 a 88% de clínquer.

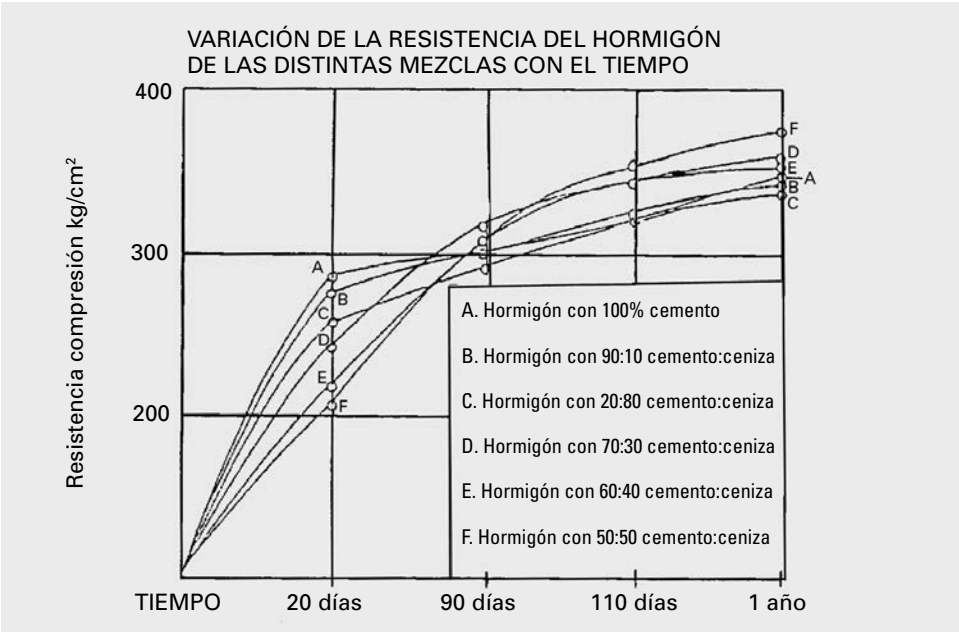


Figura 6.34. Resistencia de hormigones formulados con cenizas volantes.

- *Cemento portland con cenizas volantes, tipo II-C.* Admite cenizas volantes entre 6 y 28% y clínquer entre 72 a 94%.
- *Cemento puzolánico, tipo IV.* Este cemento puede estar compuesto por adiciones de puzolana natural o cenizas volantes en proporción del 40% y 60% de clínquer.
- *Cemento mixto, tipo V.* Admite entre un 36 y 80% de escorias metalúrgicas, puzolana natural o cenizas volantes y clínquer entre 20 y 64%.

8.2.1. Modificación de las propiedades del hormigón

El uso de cenizas volantes en el hormigón se utiliza a nivel mundial ya que modifica las propiedades del hormigón en estado fresco y endurecido y por otro lado resuelve aspectos técnicos y ambientales. Uno de los mayores problemas de la construcción de grandes presas con hormigón es la fisuración de origen térmico. Al margen de las soluciones estructurales que se aplican, es importante saber que los cementos puzolánicos de bajo calor de hidratación contribuyen a reducir estos problemas de manera importante. Así el denominado HCR (hormigón compactado con rodillo) se componen de 2/3 de cenizas volantes bajas en cal, 1/6 contienen puzolanas naturales y otra 1/5 contiene otras puzolanas (escorias metalúrgicas).

La adición de cenizas volantes a la formulación de hormigones está muy estudiada y, de hecho es su principal destino, su presencia afecta a una serie de fenómenos como:

- La ceniza volante actúa como agente nucleador para la cal. En el hormigón siempre permanece una cantidad importante de cal sin reaccionar. La ceniza volante, con su capacidad de puzolanidad, contribuye a su reaccionabilidad e incorporación a la matriz del hormigón en forma de fase activa.
- La ceniza volante contribuye a la densificación de la masa. En consecuencia se reduce la cantidad de agua precisa. La densificación mejora el contacto árido-cemento y reduce las posibilidades de segregación de los componentes.
- La forma esférica de las cenizas volantes, de tamaño muy inferior a las de cemento, mejoran y compensan la geometría angulosa e irregular de las partículas de cemento y ello contribuye a una disminución adicional de la cantidad de agua precisa.
- En determinados hormigones que se desean densificar, pero el valor de la alcalinidad no es suficientemente alto para conseguir la plena integración química, la incorporación de cenizas volantes hace las veces de árido de pequeño tamaño que ayuda a completar la distribución granulométrica del conjunto.
- Todas estas propiedades se traducen en un aumento de la resistencia mecánica del hormigón, a largo plazo, y en una resistencia mayor a

la lixiviación. Aunque ésta se pone de manifiesto al cabo del tiempo. Es por ello que las mezclas con cenizas volantes se prefieren para grandes obras públicas donde transcurre un gran tiempo entre la fabricación y fraguado del hormigón y su entrada efectiva en servicio (se ha comprobado que la resistencia mecánica se va incrementando hasta un periodo que se acerca a los diez años). No obstante, si se desea reducir el tiempo de endurecimiento se puede incrementar la alcalinidad de la fase acuosa.

Las cenizas volantes tienen una estructura mineralógica que es, mayoritariamente, amorfa. Esencialmente están compuestas por una matriz vítrea de silicato aluminoso, modificada por elementos como Ca, Na, K, Fe, Ti, etc., en función de la naturaleza del carbón. La fracción activa es la amorfa que aporta una mayor reactividad, en comparación a las fases cristalinas. En cualquier caso la cinética de las reacciones en las que intervendrán las cenizas volantes, debido a su propia naturaleza, son lentas y antes de que llegue a integrarse químicamente en el conjunto la ceniza volante debe ser disuelta en los poros que contienen agua. La solubilidad de la ceniza volante depende de la alcalinidad de la solución.

En una segunda etapa, los productos de descomposición de las cenizas volantes, principalmente SiO_2 y Al_2O_3 reaccionan con la cal remanente y forman fases resistentes. Los ensayos de durabilidad y permeabilidad han constatado que los hormigones que contienen cenizas volantes son más resistentes al ataque químico debido a que aumenta la densificación, decrece la porosidad y, sobre todo, se reduce la cantidad de cal libre.

8.2.2. Resistencia al ataque árido/álcali

Los áridos usados para la fabricación de los hormigones deben ser considerados como elementos químicamente inertes. A veces se utilizan áridos de naturaleza silícea, con carácter vítreo como son las rocas opalinas, que pueden reaccionar con los álcalis liberados por el cemento durante la hidratación.

La reacción árido/álcali es un fenómeno expansivo con repercusiones graves para el material endurecido. Se trata de una descomposición de los áridos silíceos provocada por los altos niveles de basicidad de la fase acuosa, que producen silicatos alcalinos altamente expansivos y el fenómeno tiene lugar en toda la masa del hormigón. La foto de la Figura 6.35 muestra los efectos destructivos.

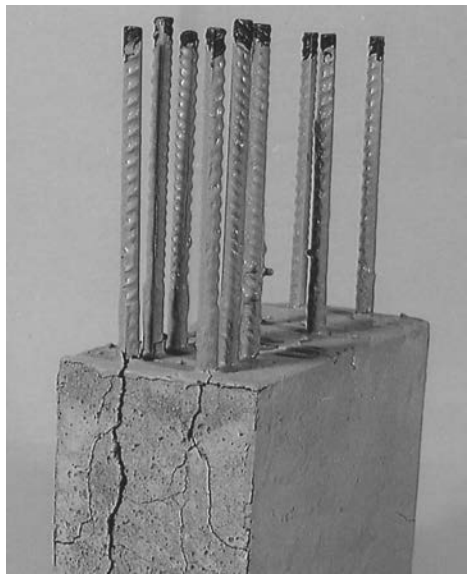


Figura 6.35. Columna de hormigón fisurada por efectos expansivos.

Los materiales puzolánicos y las cenizas volantes actúan como elementos inhibidores de la reacción expansiva. Para reducir este fenómeno (en el caso de prever problemas expansivos) se recomienda una sustitución de cemento por ceniza volante entre el 20 y el 30%. A la vez ello también ayuda a minimizar el problema de corrosión de las armaduras. Estas se corroen principalmente por el ataque de los cloruros y por la carbonatación.

Con el tiempo, la acción del CO_2 atmosférico interacciona con el hidróxido cálcico y forma carbonato cálcico y agua. El pH desciende hasta 8, la capa pasiva que rodea las estructuras se disuelve y comienza la corrosión.

Cosa diferente acontece con la corrosión de la armadura, y el hormigón en general, cuando se hallan expuestos a ambientes muy salinos (muy usuales en zonas costeras con vientos marinos frecuentes y fuertes). Los cloruros pueden estar en dos formas: como cloruros «libres», es decir en forma de iones en el agua contenida en los poros, los cuales pueden actuar agresivamente sobre las armaduras o como cloruros «combinados», quienes forman parte de las fases hidratadas del cemento, fundamentalmente como cloroaluminosos. La suma de libres y combinados se suele denominar cloruros totales. Aunque son los libres o solubles en agua los que en realidad provocan la corrosión.

Por lo general la corrosión por cloruros en las armaduras sobreviene cuando el porcentaje de cloruros oscila entre el 0,05% y el 0,1% en relación al peso de hormigón.

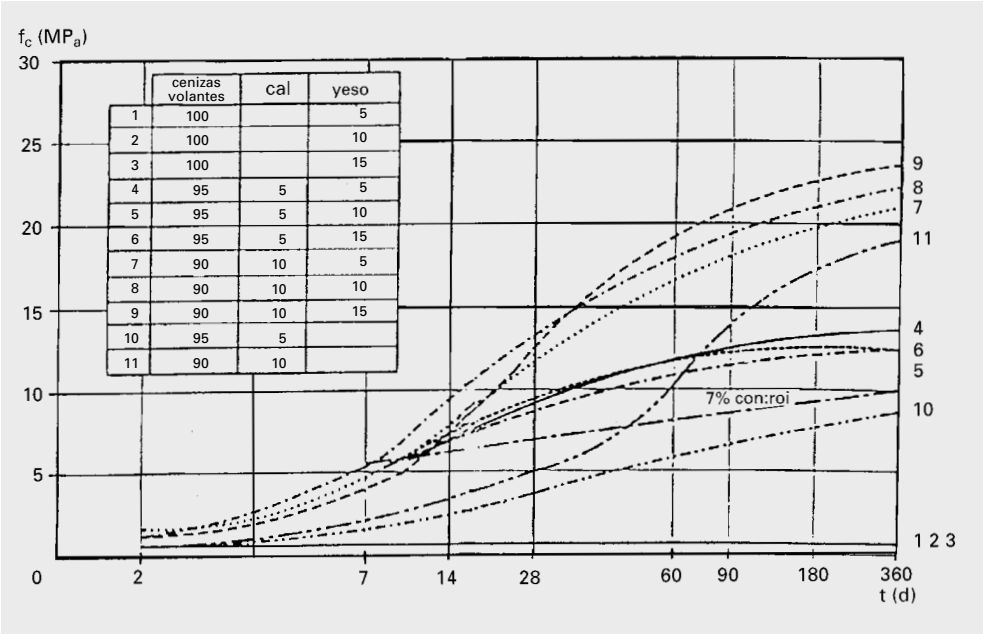


Figura 6.36. Resistencia de mezclas de cenizas volantes/cal/yeso.

8.3. MEZCLAS DE CENIZAS VOLANTES CON CAL Y YESO

Siguiendo la pauta de la teoría expuesta anteriormente, la Figura 6.36 muestra el incremento de resistencia desarrollada por mezclas de cenizas volantes con cal, cenizas volantes con cal y yeso y cenizas volantes con cemento portland en función del tiempo.

Como muestra la Figura 6.36 inicialmente sólo interviene el yeso en la mezcla con la ceniza volante, la resistencia es mínima y así permanece a lo largo del tiempo. A partir del momento que se adiciona cal se desencadena la reacción puzolánica y la resistencia aumenta con la edad de manera importante.

La Figura 6.37 expone la evolución de la resistencia a la compresión de hormigón aligerado con α-cuarzo y con cenizas volantes.

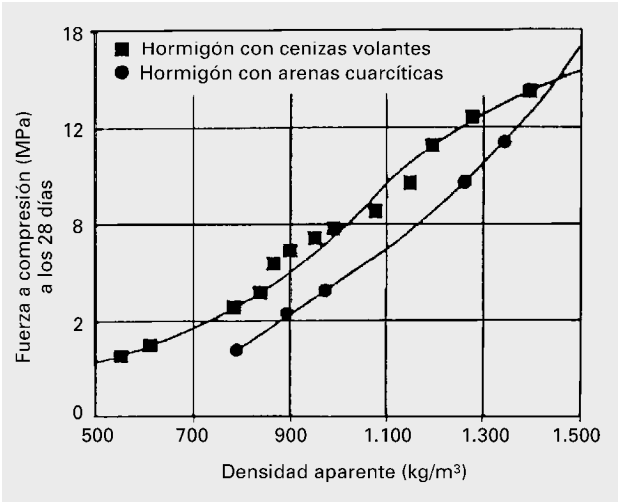


Figura 6.37. Evolución de la resistencia de unos hormigones adicionados con sílice y cenizas volantes.

8.4. BLOQUES DE ARCILLA ESTABILIZADA CON CENIZAS VOLANTES

Una de las múltiples aplicaciones de las cenizas volantes es su mezcla con arcillas y su posterior estabilización con hidróxido cálcico y/o cemento portland.

El preciso usar una arcilla de interés cerámico, es decir aquellas cuyos minerales de arcilla sean caolinita, motmorillonita, clorita, illita, etc., con el fin de que la masa adquiera la plasticidad precisa para ser extruida, como si se tratara de un ladrillo de arcilla convencional. Tanto es así, que el criterio de composición que se expone en la Tabla 6.32 sigue el principio de añadir la cantidad de arcilla necesaria para que la masa sea extrusionable. Hay que tener en cuenta que para la conformación de ladrillos de construcción la extrusión es una tecnología más económica que el prensado.

La Tabla 6.32 muestra los resultados, en particular la resistencia a la compresión en kg/cm^2, a los 30 y 90 días, en función de las composiciones indicadas. De la observación de la tabla salta a la vista que la resistencia a la compresión es mayor en aquellas mezclas que contienen cenizas volantes.

Tabla 6.32. Características de ladrillos de arcilla estabilizada

% Arcilla	% Ceniza	% C. portland	% Cal	Kg/cm² a 30 d	Kg/cm² a 90 d
94	0	6	0	20	20
88	0	12	0	30	30
82	0	18	0	50	50
40	54	6	0	70	70
40	48	12	0	130	140
40	42	18	0	160	170
94	0	0	6	20	20
88	0	0	12	25	20
82	0	0	18	30	35
40	54	0	6	40	45
40	48	0	12	95	100
40	42	0	18	110	140

8.5. BLOQUES DE HORMIGÓN ALIGERADOS

A partir de cenizas volantes se pueden fabricar un sinfín de materiales para la construcción. La puzolanidad de la ceniza volante es aprovechada, en esta ocasión, para su propia valorización y la de otro residuo: los fangos procedentes de la industria papelera.

Se fabrican bloques ligeros de hormigón a partir de la siguiente composición:

- Fango de papelera 25%.
- Cenizas volantes 60%.
- Cemento portland 15%.

La ligereza de los bloques es debida a la gran presencia de cenizas volantes y, obviamente, a la notable cantidad de fangos de papelera.

El esquema de fabricación está representado en la Figura 6.38. Las cenizas volantes y el cemento se añaden a un tanque donde se halla la pulpa de papel. Cuando el conjunto tiene una viscosidad elevada se vierte sobre una cinta de moldeo donde se conforma una placa. Seguidamente ésta se corta y se estiba en una vagoneta para su secado.

8.6. OTRAS APLICACIONES DE LAS CENIZAS VOLANTES

Las cenizas volantes se producen en las centrales termoeléctricas pero, a su vez, éstas están instaladas en las cuencas mineras, es decir muy lejos de los grandes centros habitados que es donde mas facilidad existe para el consumo de grandes cantidades de cenizas volantes. El transporte es cada vez más caro. Por ello se intenta investigar para sacar al mercado materiales, fabricados con cenizas volantes, con un valor añadido superior. Los siguientes apartados muestran una serie de ejemplos de aplicaciones.

8.6.1. Placas aislantes contra el fuego

Un elemento de construcción es resistente al fuego si el tiempo (generalmente expresado en segundos) a que es sometido el elemento (siguiendo un programa térmico normalizado) conserva la estabilidad mecánica, la estanqueidad, la no emisión de gases contaminantes y el aislamiento térmico. Así, los perfiles de acero sometidos a 450-550 ℃ pueden afectar a la resistencia mecánica. Una de las aplicaciones de las cenizas volantes consiste en la fabricación de paneles aislantes para la seguridad de estructuras metálicas contra incendios.

El hormigón proyectado o gunitado (también puede prepararse un molde, colar el hormigón y retirarlo cuando tenga suficiente consistencia) de hormigón rico en cenizas volantes no constituye un elemento aislante según los cánones de la física, no obstante desde la óptica de la seguridad, es factible diseñar un material que impida que en el tiempo establecido alcance la temperatura crítica, de acuerdo con la expresión:

$$T = 20 + 345 \cdot \log_{10} \cdot (8 \cdot t + 1)$$

Donde T es la temperatura del horno (que simula la esperada en un incendio) y t el tiempo en minutos desde el comienzo del ensayo. Para perfiles metálicos, la capacidad aislante se determina midiendo el tiempo necesario para que el acero alcance los 450 ℃, de acuerdo con la norma UNE 23820:1997.

Con espesores de 3 cm, estos hormigones tienen unas prestaciones similares a las proporcionadas por

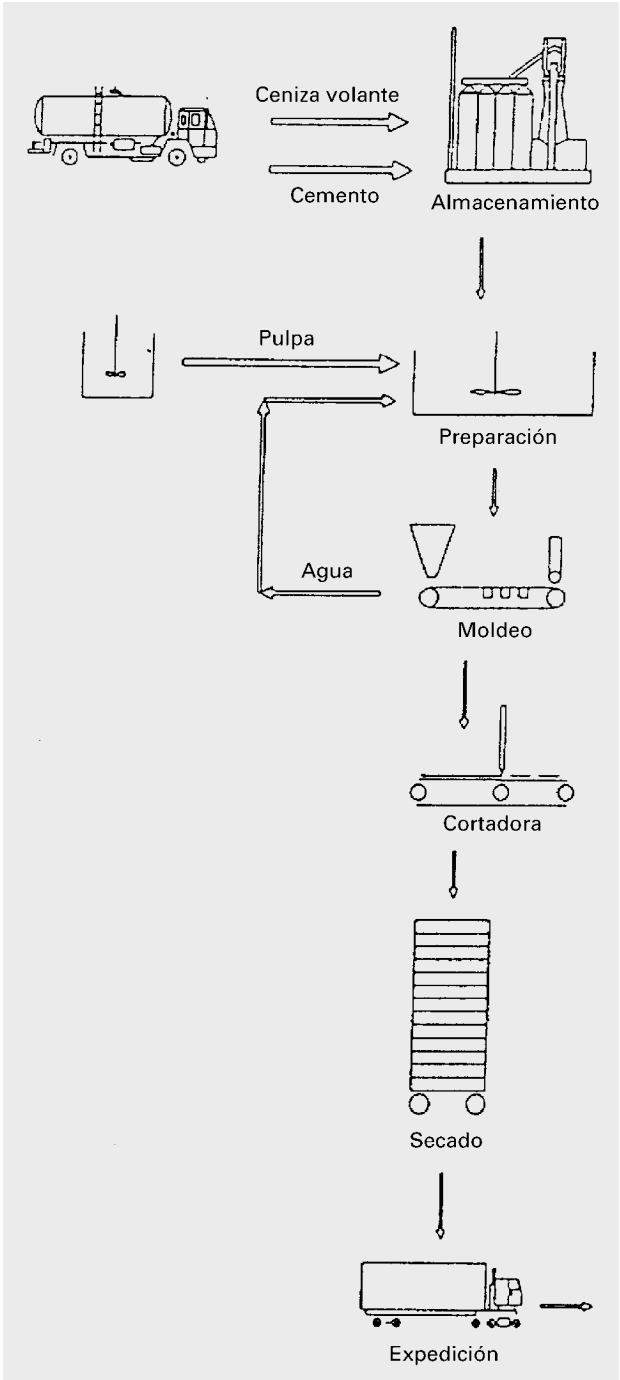


Figura 6.38. Esquema de la fabricación de bloques de cenizas volantes/portland y pulpa de papel.

los materiales convencionales usados para estos propósitos. Para ello se usan hormigones con un contenido de cenizas volantes de hasta un 60% en peso, vermiculita exfoliada, aditivos y poco cemento, obteniéndose una densidad del orden de 600 kg/m^3. De hecho los hormigones con densidades inferiores a 900 kg/m^3, pueden considerarse aislantes, lo que trae como consecuencia la dificultad en la transmisión del calor.

8.6.2. Cenizas volantes como estabilizadoras del suelo

Se entiende por estabilización de suelos el acondicionamiento de un terreno para usos posteriores concretos. En el caso de suelos arenosos el procedimiento consiste en añadir un material que lo endurezca o solidifique en presencia de agua. Los conglomerantes hidráulicos o la escoria de alto horno presentan esta propiedad. También las puzolanas naturales y las cenizas volantes (si son autoendurecibles) sirven para estabilizar. Estas últimas se deben mezclar con cal y agua para lograr el objetivo.

El sistema de estabilización ha adquirido un gran desarrollo para la construcción de caminos rurales. En función de la ceniza volante una mezcla adecuada sería del 5 al 10% de cal, por 10-25% de cenizas volantes si se trata de un terreno arenoso.

Si el terreno tiene mucha materia orgánica se emplean cenizas volantes con un alto contenido en cal.

8.6.3. Ceniza volante como material para la construcción de carreteras

La ceniza volante presenta, de cara a la construcción, una característica importante que consiste en su finura que permite su empleo como árido fino a la vez que manifiesta sus propiedades cementicias, de forma que su aplicación puede llevarse a cabo directamente en el hormigón.

En EE UU se ha usado una mezcla de grava/cal/ceniza volante y agua para la construcción de bases y subbases de carreteras. En España se han fabricado con grava/cemento y cenizas volantes, siendo la proporción entre cemento tipo V y cenizas volantes de: 1,9:1. En Asturias se dosifican mayores cantidades de cemento, hasta 400 kg/m^3, pero con unos contenidos de cenizas del 75%.

El conjunto grava/ceniza-volante/cemento se prepara como cualquier mezcla y, a causa de las características de las cenizas volantes especialmente su forma y tamaño, es más sencilla de compactar que la mezcla grava/cemento tradicional. En cambio la adición de cenizas hace a la mezcla más sensible a los excesos de humedad. Por lo general se produce un retraso en el fraguado que permite la compactación adecuada. El calor de hidratación también suele ser menor lo que reduce los problemas de retracción y fisuración.

Con el tiempo la adición de cenizas volantes ha ido en aumento y ello conlleva un retraso excesivo en adquirir consistencia. La deficiencia se ha compensado, en las mezclas con más del 90% de cenizas volantes con la incorporación de un 5% de fosfoyeso y 44% de cal. Una mezcla muy frecuente es 85% grava, 13% cenizas volantes y 2% de cal.

La adición de cenizas trae consigo un incremento de la durabilidad, ya que la poca porosidad generada aumenta la impermeabilidad y, en consecuencia todo tipo de ataque químico procedente de sulfatos, cloruros y resiste bien los ciclos de hielo/deshielo.

8.6.4. Prefabricados

La dosificación de las cenizas volantes a los elementos prefabricados se realiza en proporciones variables en función de la aplicación. Algunos fabricantes incorporan hasta un 35% en el material cementante (curado con vapor de agua a presión). Si se usa vapor a alta presión se consigue una resistencia equivalente a la lograda en atmósfera húmeda a la edad de 28 días. Por lo general se emplean cenizas volantes de alto contenido en cal. Si las cenizas son de bajo tenor en cal se debe dosificar una cantidad menor.

En el caso de fabricación de bloques para la edificación en climas fríos hay que valorar la resistencia al ciclo hielo/deshielo. Para ello puede recurrirse a la técnica del «aire ocluido» y, naturalmente, cenizas volantes. El material fabricado es más liviano, densidad entre 500 y 1.600 kg/m^3, lo que le hace más aislante térmico y por tanto de mejores prestaciones contra eventuales incendios.

Otra aplicación muy interesante es la fabricación de tubos, en particular para conducciones de aguas residuales. Dosificando adecuadamente las cenizas volantes se consigue un material menos permeable y más resistente al ataque de los sulfatos y los ácidos, como muestra la Figura 6.39.

Las aguas residuales, en ambiente anóxico y presencia de compuestos de azufre, generan H_2S que en contacto con el aire forma ácido sulfúrico (en caso de ausencia de aire, el propio sulfuro de hidrógeno es también corrosivo) que corroe las paredes internas del conducto hasta su destrucción. El empleo de cenizas volantes en la fabricación incrementa la resistencia a la agresión química y reduce el calor de hidratación del hormigón con lo que disminuye la aparición de grietas y fisuras que son muy vulnerables a la estabilidad.

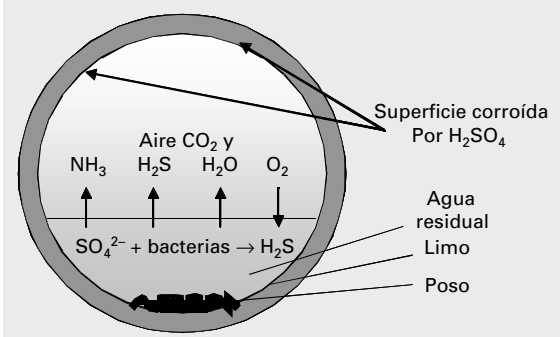


Figura 6.39. Ataque de ácidos a una tubería de aguas residuales.

Otra aplicación interesante es el uso de cenizas volante para la fabricación de bloques rompeolas (tetrápodos), ya que las cenizas aumentan la durabilidad frente al ataque por agua de mar.

El DVD adjunto, en el punto 7, se muestra un tipo de árido ligero fabricado a partir de ceniza volante y varias soluciones de prefabricados.

8.6.5. Materia prima para cerámica y vidrio

Las cenizas volantes son residuos ricos en sílice, alúmina y óxidos de hierro, componentes comunes en las arcillas de interés cerámico. Desde el punto de vista de la ceramización la inclusión de cenizas volantes presenta la particularidad de que la gran fase amorfa presente acelera las reacciones propias de la cerámica, lo que equivale a decir que no es necesario alcanzar las temperaturas habituales de fabricación de ladrillos puesto que las cenizas, con su fase amorfa, reducen la temperatura de trabajo.

La gran cantidad de fase amorfa presentes en las cenizas volantes es la que permite sustituir grandes cantidades de arcilla, se puede rebasar el 50%, en la fabricación de materiales cerámicos, es la misma que limita su aplicación como materia prima para la fabricación del clínquer en sustitución de la arcilla, pero en cantidades máximas del 8%. El mismo razonamiento puede ser empleado para postular el empleo de cenizas volantes para fabricación de vidrio y vitrocerámicos. Para esta última aplicación el mayor problema deviene de la heterogeneidad de las cenizas disponibles (en el caso de pretender fabricar determinadas clases de vitrocerámicos), sin embargo tiene la ventaja de permitir la fabricación de pavimentos (vitrocerámicos) con altas prestaciones.

Tabla 6.33. Análisis de cenizas volantes de interés cerámico

Origen ceniza volante	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	$Na_2O + K_2O$	TiO_2	SO_3
Gran Bretaña	51,4	26,8	11,1	1,5	1,4	5,0	0,9	0,6
Canadá	57,8	23,0	3,5	9,9	1,5	2,9	—	0,3
Italia	31,5	16,0	31,0	15,0	—	1,5	—	—

En el caso particular de la fabricación de ladrillos, en numerosos países existen ladrillerías que producen ladrillos con cantidades variables de cenizas volantes. Para estas aplicaciones es conveniente usar cenizas volantes en las cuales la relación SiO_2/Al_2O_3 sea la mayor posible ya que ello proporciona, indirectamente una idea del grado de vidrio siempre presente. La Tabla 6.33 presenta análisis químicos de cenizas volantes empleadas en ladrillería.

En general, en los ladrillos comunes fabricados por extrusión en «vía húmeda», la cantidad de cenizas volantes puede estar limitada por la pérdida de plasticidad. Sin embargo, en la variante de prensado (la llamada «vía seca» puesto que la humedad de conformación se halla entre el 5 y el 12%) la adición de cenizas volantes puede sobrepasar el 80%.

De cara a la valorización, la reducción de la temperatura de cocción y el ahorro en materias primas son los principales alicientes. No obstante existen algunas desventajas como la menor resistencia mecánica en seco (ello solo afecta al proceso de fabricación) una menor resistencia a la helada y básicamente la tendencia a la aparición de eflorescencias.

Otra aplicación notable de las cenizas volantes es su uso como materia prima para la fabricación de áridos ligeros. Para ello se precisa una ceniza rica en carbono, es decir con mucho inquemado, puesto que el carbono se va a utilizar como elemento expansor. La densidad aparente del árido expandido suele estar comprendido entre 800 y 900 kg/m^3 (la de un árido pétreo es del orden de 1.600 kg/m^3). Los áridos ligeros permiten fabricar hormigones con densidades comprendidas entre 1.000 y 1.700 kg/m^3, valor que supone casi la mitad del hormigón convencional.

Las cenizas volantes también se emplean para la fabricación de fibras. En este caso, una vez perfectamente homogeneizadas y caracterizadas, todo son ventajas ya que al tratarse de un material básicamente vítreo, existe una gran economía energética en la fusión.

En el campo de los vidrios y vitrocerámicos, que se desarrolla con detalle en el capítulo siguiente, se está investigando el empleo de las cenizas volantes para la fabricación de vitrocerámicos para el confinamiento de residuos de media y baja radioactividad.

Debido a la gran cantidad de cenizas volantes que se generan los investigadores no cejan en el trabajo de hallar nuevas aplicaciones. En 2006, un grupo de trabajo del Consejo Superior de Investigaciones Científicas ha desarrollado un nuevo cemento que se genera por activación alcalina, que consiste en mezclar las cenizas con compuestos alcalinos que convierten el polvo en un sólido compacto, a base de aluminosilicatos. Se trata de un proceso químico distinto al que tiene lugar en la hidratación del cemento convencional. El nuevo material es capaz de absorber algunas sustancias nocivas de pinturas, fangos y adquiere características flexibles a elevada temperatura.

9. Valoración de los lodos de las ETAP's (Estaciones de Tratamiento de Agua Potable)

El agua destinada a la potabilización para el consumo humano se suele tomar directamente del cauce de un río. Esto supone que las bombas de aspiración incorporen gran cantidad de tierra y barro del lecho del río, así como todo lo arrastrarlo por la propia corriente como algas, microorganismos y restos orgánicos. Por lo general, estos materiales en suspensión son fácilmente sedimentables.

Una vez llevada a cabo la captación el agua se somete a un proceso de decantación y centrifugación, habitualmente con floculantes, proceso que genera enormes cantidades de lodos (la naturaleza de la fracción sólida es básicamente inorgánica, de ahí el sustantivo lodo en vez de fango).

En función de la calidad de los parajes atravesados por la corriente de agua el lodo, una vez deshi-

dratado, podrá emplearse como aditivo en la industria cerámica.

9.1. VALORIZACIÓN CERÁMICA DE LODOS DE ETAP

La gran cantidad de lodos generados (del orden de 0,01 m^3 de lodo por m^3 de agua potabilizada, valor que naturalmente depende de la turbidez del agua tratada), si la caracterización de los limos y arcillas contenidos son de interés cerámico, pueden valorizarse por medio de un proceso de atomización, tratando el lodo como una barbotina (emulsión de arcilla cerámica y agua) cerámica. Para ello se emplea un atomizador, como el que se usa para fabricar la leche en polvo.

El funcionamiento de un atomizador se muestra en el esquema la Figura 6.40. Las bombas (3) envían la barbotina a presión constante hacia la turbina, o sistema de pulverización (4) en la torre de secado (1), o cámara de secado propiamente dicha. Uno de los principios de buen funcionamiento exige que las gotas no lleguen a alcanzar la pared de la torre o, si lo hacen sean interceptadas por un chorro de aire que desciende paralelo a la pared de la cámara. La torre dispone de un sistema de apertura graduada en (9), de fácil desmontaje y limpieza.

En el caso de los atomizadores a contracorriente, la barbotina a presión es lanzada contra la masa de aire caliente en el interior de la torre, producido por un generador de calor (5). Este aire, mediante una tubería de acero aislada, entra en la torre a través de un difusor (9), creando un vórtice. Los polvos secos se descargan a un transportador por medio de una válvula alveolar (10).

Los polvos finos residuales que, por tener un tamaño de grano muy fino, no caen, son aspirados por el sistema extractor de aire húmedo y recuperados por los ciclones (8) y, posteriormente, por un filtro de mangas o, si se estima que el aire contiene cierta cantidad de gases ácidos (como sería el caso derivado del uso de gases de escape de un equipo de cogeneración) a un sistema de lavado en seco (2). Luego el aire limpio se lleva a la chimenea mediante un ventilador de succión (7).

Generalmente, el cuerpo principal del atomizador es cilíndrico, los volúmenes de gases calientes se introducen desde arriba, distribuidos tangencialmente y el intercambio térmico se realiza a contracorriente a la barbotina nebulizada y proyectada desde abajo hacia arriba, como muestra la Figura 6.40.

Se comprende que la intervención de tantos factores pueda dar como resultado que las características del polvo atomizado, básicamente distribución granulométrica y humedad varíen. Desde el punto de vista de la aplicación cerámica estos son los parámetros más importantes a mantener.

Desde la óptica de la valorización, evaporar agua es caro, por ello se recurre a un sistema de cogeneración con turbina de gas (mientras el precio del gas natural permita la rentabilidad del proceso). La electricidad producida se vende y los gases calientes de escape se emplean para el secado «flash» de los lo-

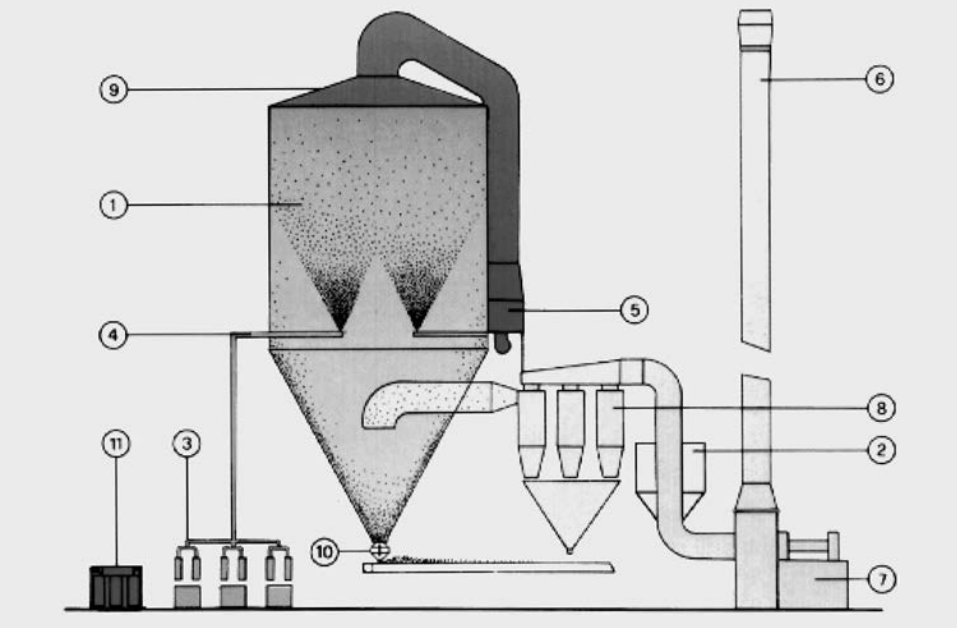


Figura 6.40. Esquema de un atomizador.

dos. Este autor llevó a cabo la investigación básica para la valorización cerámica de los lodos de ETAP de la planta de Agbar en Sant Joan D'espí (Barcelona), que más tarde se realizó a escala industrial con una producción de lodos de 17.000 m^3/día, con una concentración de entre 3,5 y 5 kg/m^3 de materia seca en los decantadores y 0,3 a 0,5 kg/m^3 para las aguas procedentes del lavado de filtros.

El DVD adjunto, en el punto 8, se muestra un atomizador así como la geometría del polvo atomizado.

9.1.1. Naturaleza del polvo atomizado

Con respecto al secado de los tradicionales materiales cerámicos, el secado de barbotinas, en este caso lodos de ETAP, constituye un caso particular por dos motivos: los efectos de choque térmico o estrés en el producto acabado pasan a un segundo plano (de hecho se aprovecha este factor para conseguir la geometría del típico atomizado cerámico) y la relación superficie/volumen es muy diferente del secado de los materiales convencionales.

El proceso de la evaporación es directamente proporcional a la superficie de intercambio. En el caso de los lodos de ETAP las gotas pueden tener una distribución media de 250 mm de diámetro. Esto supone que la relación superficie/volumen para las gotas puede ser entre 400 y 600 veces superior que en los materiales estructurales convencionales.

Si bien el tiempo medio de residencia de las gotas «tiempo de secado» es muy corto (entre 4 y 6 segundos), el enérgico intercambio térmico en la interfase del líquido con los gases que se hallan a más de 500 °C, provoca la vaporización instantánea del agua. El material tiene una sequedad de salida del orden del 95%.

El vapor de agua generado ejerce una presión en el interior de la esfera de materia seca, provocando un aumento de volumen hasta que se abre un pequeño orificio que facilita la evacuación del vapor. La formación de estas esferas huecas da lugar a productos más ligeros (de hecho se asemeja mucho a una manzana).

A los lodos de ETAP durante la fase de centrifugación se le añaden sustancias floculantes. Estos productos están contra indicados para la etapa de atomización ya que aumentan mucho la viscosidad y ello dificulta la atomización. Sin embargo, algunos de estos floculantes contienen sales de aluminio que inhiben la típica reacción cerámica que proporciona color rojo a la pasta debido a la presencia de Fe^{3+}, y el material cocido sale de un color razonablemente blanco muy apreciado por los ceramistas. En el caso de la planta citada, la Tabla 6.34, muestra el análisis medio del material atomizado.

Tabla 6.34. Caracterización estándar de un lodo de ETAP

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	$Na_2O + K_2O$	Materia orgánica
Lodo ETAP	50,0	13,5	1,0	14,0	3,0	10,0

La caracterización responderá, obviamente, a la naturaleza de los limos y arcillas presentes en el cauce del río. Este lodo tiene un análisis muy próximo a las arcillas de interés cerámico y con pocos ajustes se puede valorizar perfectamente. Lo remarcable es la gran presencia de materia orgánica procedente de los restos de materia carbonosa de los filtros, de los floculantes y de otras impurezas presentes.

9.2. VALORIZACIÓN DE LODOS DE GRAVERAS

Antiguamente las extracciones de áridos se llevaban a cabo en el mismo lecho del río. La operación consistía en dragar y tamizar. El árido se separaba y el impacto sobre la fauna y flora era enorme. En algunas partes se ha prohibido la actividad así descrita y, en otras, sencillamente se ha dejado de practicar por haber agotado la fuente de suministro. En la actualidad la grava se obtiene mayoritariamente a partir de piedra que se extrae de cantera, se machaca, se clasifica y se lava. El consumo de agua es, aproximadamente, de 2 m^3/t de árido, es por esta razón que todavía subsisten muchas instalaciones cerca de los cauces naturales de agua. El procedimiento habitual consiste en tomar agua, lavar la grava y devolver el agua sucia al río. Cuando se ha puesto coto a esta práctica ha surgido, inevitablemente, el problema de los lodos.

La generación de lodos es muy elevada y el sistema de tratamiento consiste en una balsa de decantación para terminar en un filtro prensa.

En función de la naturaleza del sedimento arrastrado éste sistema de tratamiento es lento, habida cuenta que la mayor parte de las partículas tienen un tamaño inferior a las 100 µm. Normalmente se utiliza un floculante para acelerar la operación.

La caracterización de estos lodos es una función directa de la naturaleza geológica del lecho del río y de los parajes que atraviesa. Lo normal es que lleve limo y otros minerales de tamaño muy pequeño, no

obstante la cantidad más importante procederá de la roca que se ha triturado para la obtención de la grava. Desde el punto de vista de la valorización el factor más importante es que el tamaño de partícula medio es muy pequeño y ello favorece la mayoría de las aplicaciones. Sin embargo, el principal inconveniente es la humedad residual que todavía contienen.

La situación de carencia de áridos es alarmante en algunas zonas. Por ejemplo, en Cataluña (con algo más de 7 millones de habitantes), existían en 2005, algo más de 300 canteras y graveras que producían 60 millones de toneladas de piedras y arenas al año, para fabricar hormigones, cemento y otros materiales de construcción. Esto supone un tráfico diario continuo de 20.000 camiones lo que provoca un impacto ambiental importante (ruido, polvo, contaminación atmosférica y, a veces, detonaciones). Además, las reservas actuales se estiman en 600 millones de toneladas, lo que equivale a un horizonte de 10 años de producción. De todo ello se colige que la situación no es sostenible y hay que tomar medidas urgentes.

10. Valoración de residuos de la industria metalúrgica

Las escorias son residuos que se generan en grandes cantidades y, en general tienen una característica fisicoquímica que las particulariza: su estructura semi vitrificada. Ello supone que, en la mayoría de los casos pueden valorizarse directamente sin llevar a cabo ningún tipo de pretratamiento, es decir se pueden emplear a granel, como es el caso de la preparación de subbases de firmes de carreteras.

También sin necesidad de una excesiva trituración se usan como relleno de pastas cerámicas. La distribución granulométrica de las arcillas se caracteriza por tener granos finos para resaltar la plasticidad, ello trae como consecuencia un aumento de la contracción y, por tanto, una disparidad en la medida de los fabricados. Cuando se añade una escoria con un tamaño superior a las 500 mm, las propiedades son:

- Desde el punto de vista cerámico, al margen de reducir costes, disminuye la contracción total y mejora la estabilidad dimensional. Por otra parte la interfacie entre la escoria y la matriz cerámica es buena ya que la superficie de la escoria es de naturaleza vítrea.
- Desde el punto de vista ambiental. La escoria esta bien vitrificada y es prácticamente imposible que pueda lixiviar, en caso de ataque de agua ácida o desgaste mecánico.

10.1. MEJORA DE LA RESISTENCIA AL FUEGO DE HORMIGONES

Algunos tipos de hormigón exigen un comportamiento específico a altas temperaturas. Aunque el hormigón es considerado como un material incombustible, en general el calor excesivo puede causar fenómenos patológicos que inducen a pérdidas muy elevadas de resistencia mecánica y cambios en sus características microestructurales. Los cambios físicos están relacionados con las tensiones de origen térmico ocasionadas por las dilataciones y contracciones de la masa de hormigón. Mientras que los denominados microestructurales o químicos están ligados a la deshidratación de los componentes de la pasta o fase aglomerante y a los áridos del propio hormigón (por ejemplo, un árido calcáreo se descompondrá a más de 800 ℃ y la salida del CO_2 ayudará a desintegrar y aumentar la transferencia de calor, es decir como una reacción en cadena). Además la aparición de grietas dejará el acero expuesto a la alta temperatura y la corrosión.

Un hormigón portland con escorias de alto horno activadas alcalinamente (con mezclas de Na_2SiO_3 y NaOH), convierte el material en un producto casi refractario, es decir que soporta las solicitaciones mecánicas a alta temperatura. La Tabla 6.35 muestra los análisis químicos típicos de los principales ingredientes.

Tabla 6.35. Análisis de componentes de hormigones de buena resistencia al fuego

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	PF
Cemento portland	20,9	6,1	3,8	63,3	1,7	1,9	0,7
Escoria de alto horno	32,0	16,6	2,3	42,0	0,7	5,7	3,5
Microsílice	96,8	1,9	0,5	0	0	0	0,4

Los hormigones así formulados se comportan razonablemente bien hasta 700 ℃. El cambio de color en función de la temperatura esta considerado como un parámetro indicativo de otras propiedades. En conclusión, los hormigones preparados con escorias siderúrgicas pueden retener porcentajes muy elevados de su resistencia mecánica original a temperaturas superiores a 500 ℃. En caso de bloques para soportar carga de fuego, los ensayos han demostrado que las arenas calcáreas aguantan mucho mejor que las siliceas (éstas tienen un módulo de elasticidad mayor) cuando son sometidas a temperaturas de 900 ℃.

10.2. APLICACIÓN DE LOS FLUIDOS SUPERCRÍTICOS A LA VALORIZACIÓN

La tecnología de fluidos supercríticos (FSC) se ha desarrollado debido a la necesidad de proporcionar nuevas herramientas para la valorización de residuos, que ahorren energía y sean más respetuosos con el medio ambiente.

Se define como FSC a una sustancia que se encuentra en condiciones por encima su temperatura y presión crítica correspondiente, en estas circunstancias los estados de líquido y vapor saturado son idénticos. Presentan características similares a las de los líquidos como su densidad y otras propias de los gases como la difusividad y viscosidad lo que incide positivamente sobre la capacidad de transferencia de masa. Además su tensión superficial es igual a cero lo que permite una fácil penetración en los microporos de matrices vegetales y polímeros. Como consecuencia de estas propiedades, los componentes orgánicos son altamente solubles en los FSC.

El CO_2 es la sustancia más utilizada como FSC (se trata de un «disolvente verde»), debido a que presenta ventajas relacionadas con su bajo coste (hoy en día esta aplicación puede verse potenciada por el Protocolo de Kyoto) y sus propiedades físicas críticas bajas (7,38 MPa y 304,15 ₭), no es corrosivo (en ausencia de humedad), no es tóxico ni inflamable.

Un dato importante a resaltar es que el CO_2 que no ha reaccionado con la sustancia a trabajar, se recupera y se emplea en un circuito cerrado, por lo que podría decirse que se trata de una operación relativamente cara de instalación pero barata de explotación. Actualmente esta tecnología se halla desarrollada a escala industrial para la obtención y/o eliminación de una serie de substancias, entre las que cabe destacar:

- Obtención de café y té descafeinados. La cafeína es un alcaloide (trimetilxantina) que está presente en el café (0,8 a 2,1%), té (1,5 a 5,5%) y otras plantas. El proceso consta de una etapa de extracción que opera a presiones entre 16 y 22 MPa y otra de separación de la cafeína del CO_2.
- La extracción de aceites esenciales y especies es la aplicación industrial más extendida. Se opera a presiones de 35-45 MPa y temperaturas entre 40 y 70 ℃, de esta suerte no se evaporan los aceites esenciales y permite obtener resinas, colorantes, ácidos grasos y ceras entre otros.
- Procedimiento para extraer pesticidas de los cereales. En el caso del arroz, usando entre 7 y 15 kg de CO_2 por kg de arroz, se consigue reducir la cantidad de pesticidas hasta valores inferiores a los permitidos por la legislación.
- Tratamiento del corcho por fluidos supercríticos. El material que se emplea para la fabricación de tapones de botellas de vino debe ser puro y exento de contaminantes. Los TCA son ésteres aromáticos volátiles presentes en el corcho que generan alteraciones organolépticas en el vino.

10.2.1. Fabricación de ladrillos de escoria con FSC

Por medio del CO_2 es posible fabricar ladrillos de altísima calidad con residuos. El proceso indicado, bien desarrollado en la Universidad del Valle, Cali (Colombia) puede fabricar íntegramente estos materiales de manera que todos los componentes sean residuos. La Figura 6.41 muestra la secuencia de producción.

La base del éxito es la preparación de la cal, que debe tener una finura menor de 0,7 mm lo que es difícil de obtener con medios convencionales de trituración pero, en estas circunstancias cuando se añade el CO_2 la reacción es muy rápida y efectiva. Al proceso también ayuda el hecho de que las escorias, si están bien trituradas, exhiban propiedades puzolánicas. Si se añade un residuo con estas propiedades, como las cenizas volantes de centrales termoeléctricas, el fenómeno se acrecienta ya que al efecto puzolánico se deberá añadir la síntesis hidrotérmica.

Como relleno se pueden emplear áridos de derribo, cascote de cerámica, arenas de fundición o cualquier tipo de residuo de cierto tamaño. Desde el punto de vista económico la elección de estos elementos de relleno resulta fundamental ya que pueden sobrepasar el 80% en peso. Una vez dosificados los in-

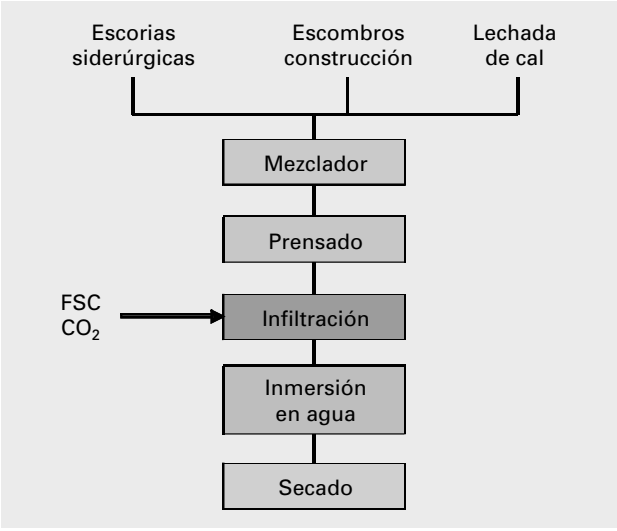


Figura 6.41. Fabricación de ladrillos de escoria metalúrgica a base de FSC.

gredientes se introduce en una prensa para compactar y conformar la forma geométrica deseada (la presión de trabajo puede oscilar de 50 a 250 kg/cm^2). Seguidamente se procede a la infiltración del CO_2 supercrítico que reacciona inmediatamente con la cal generándose el carbonato cementicio. Esta reacción es exotérmica por ello se debe refrigerar para evitar la aparición de grietas de origen térmico que reducirían la resistencia mecánica. Finalmente el material se seca (a veces debe ir mojándose si la inmersión no ha sido suficiente) al aire libre, o en un invernadero y esta listo para su uso. También puede usarse un autoclave, el fraguado es más rápido, sin embargo el resultado final difiere mucho.

10.3. BLOQUES DE ESCORIA

Un sistema de valorización, alternativo del descrito anteriormente consiste en tomar la escoria metalúrgica finamente dividida, al menos con tamaño inferior a 75 mm, mezclarla con cemento portland y sílice amorfa. El conjunto se conforma, para adquirir la geometría de bloques y/o ladrillos y se cura en autoclave durante 4 horas a 180 ℃.

La acción de sílice amorfa es definitiva para la resistencia mecánica del bloque fabricado. El material, que puede contener más de un 80% de residuos, presenta una resistencia mecánica excelente gracias a la intervención de la sílice amorfa. Sabido es que una parte de cal contenida en el cemento portland, queda sin reaccionar. Al adicionarle la sílice amorfa, material muy reactivo, reacciona con el resto de cemento y forma un conjunto de fases cristalinas (compuestos de SiO_2-CaO-Al_2O_3) que proporciona una gran resistencia al conjunto. Ello conlleva una ventaja adicional que permite utilizar menos cemento portland en la formulación.

El diagrama triangular de la Figura 6.42 muestra que la máxima resistencia mecánica de la mezcla se obtiene para una cantidad de escoria ligeramente superior al 60%.

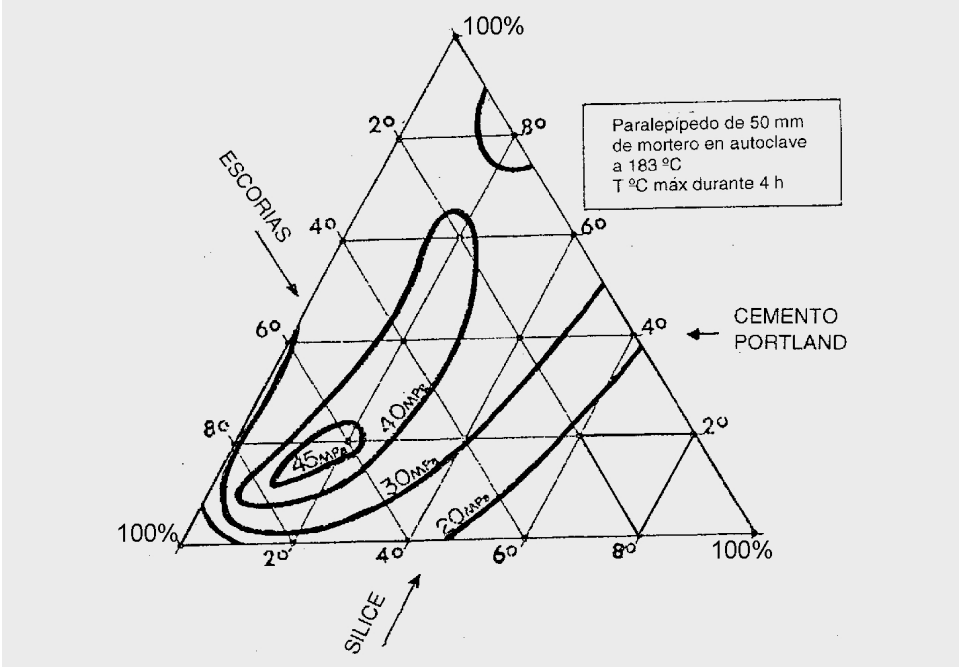


Figura 6.42. Resistencia de mezclas cemento/cal/escorias/sílice.

10.4. LADRILLOS DE CAL CON ADICIÓN DE ESCORIA DE FUNDICIÓN

La fabricación de ladrillos de cal y arena, ladrillos de silicato cálcico, curados en autoclave se ve favorecida por la inclusión de escoria granulada procedente de las fundiciones de hierro.

La escoria tiene un análisis químico medio, expresado en % de peso, como indica la Tabla 6.36.

Tabla 6.36. Análisis químico de escoria de alto horno

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	PF
Escoria de alto horno	38,8	7,6	10,5	34,5	1,5	0,6	6,2

En comparación con el análisis que muestra la Tabla 6.35, se observan lógicas diferencias puesto que su procedencia es distinta.

Esta escoria presenta una naturaleza básicamente vítrea puesto que se ha generado a alta temperatura (a la temperatura de fusión del baño) y se ha enfriado a cierta velocidad (a medida que la velocidad de enfriamiento es más lenta la recristalización de fases como la mullita, diópsido, magnetita, etc., son más elevadas y la reactividad más reducida). Una vez finamente molida adquiere una superficie específica de 3.200 cm^2/g y una densidad de 3.000 kg/m^3.

Del análisis se desprende que la composición química denota un carácter ligeramente ácido y una pobre actividad. La reaccionabilidad se la proporciona la superficie específica. La Tabla 6.37 muestra la mejora de resistencia mecánica (1 Mpa = 10 kg/cm^2) que experimentan las formulaciones estándar usadas para la fabricación de ladrillos de silicato cálcico cuando se le adicionan ligeras cantidades de escoria.

Tabla 6.37. Características de ladrillos de escoria de fundición

% Cal viva	% Escoria	% Arena	Resistencia mecánica (MPa)	Absorción agua (%)
8	—	92	13,4	11,7
8	1	91	14,5	11,3
8	2	90	17,1	11,4
7	2	91	13,2	11,9
7	1	92	12,8	12,4
6	2	92	11,5	12,2

En el proceso de fabricación, las materias primas se mezclan con una cantidad de agua (7-8%) y se someten a una etapa de homogeneización a 80 ℃ durante un cierto tiempo. Más tarde se prensan, en función de la geometría del ladrillo la presión oscila de 10 a 30 MPa y se introducen en una autoclave a una presión de 16 MPa durante 4 horas.

Como muestra la anterior tabla, a igualdad de cantidad de cal, la resistencia mecánica es máxima cuando se añade un 2% de escoria debido a la hidratación parcial de la misma.

10.5. OTRAS APLICACIONES DE RESIDUOS METALÚRGICOS

La reutilización de polvos de convertidor mediante filtración a alta presión, es ya una realidad en numerosas acerías. En la producción de acero, el proceso de afinación ofrece una posibilidad de valorización que se ha postergado en el tiempo, consistente en la presencia de gran cantidad de partículas sólidas ferruginosas, en los gases de descarga del convertidor básico. En el sistema convencional de lavado de gases se generan unos lodos muy ricos en hierro que eran depositados en el vertedero. En la actualidad se aplica una filtración a alta presión que consiste en extrusionar la pasta (se deshidrata a la vez) y se obtienen unas briquetas que pueden ser reintroducidas en el convertidor o bien someterlas a una operación de calentamiento como la que se describe seguidamente.

Los lodos, o pelets ya extrusionados, también pueden usarse como materia prima para la extracción de pigmentos colorantes, en particular de hierro. Se entiende por pigmento aquella partícula de pequeño tamaño, prácticamente insoluble en el medio aplicado y utilizada por sus propiedades colorantes, protectoras o magnéticas.

La base del tratamiento para la valorización consiste en un calentamiento al aire a una velocidad de 20 ℃/min. Los análisis de difracción de rayos X confirman que, a una temperatura de 700 ℃, las fases cristalinas mayoritarias son magnetita (Fe_3O_4), hematita (Fe_2O_3) y wustita (FeO). Al alcanzar los 1.200 ℃, la hematita permanece como única fase cristalina. El pigmento conseguido se emplea como colorante para pastas y esmaltes cerámicos.

11. Valoración de residuos destinados a la fabricación de acumuladores de calor

Una de las aplicaciones mas útiles de los residuos densos, como muchos de los que se han citado a lo largo de este capítulo, es la construcción de artilugios y sistemas para el almacenamiento de calor. La acumulación de calor, en particular en las paredes destinadas a viviendas, es un concepto que había caído en el olvido y que la arquitectura sostenible ha resucitado en los últimos años.

Nuestros ancestros, sin duda por el desconocimiento de las técnicas constructivas y sobre todo por la carencia de materiales de construcción, fabricaban las viviendas a base de grandes bloques de piedra y rellenaban las juntas con arcilla y/o tierra. Al visitar una cueva, una construcción similar o una catedral, se advierte un confort térmico que muchas veces se nota en falta en las viviendas modernas. La causa de ello estriba en que el calor se «conserva» o mejor dicho: cuando se calienta un objeto denso, que además suele ser conductor de calor, aquél acumula calor. Por ende el grueso espesor de la masa potencia la característica de aislamiento, por lo que el muro, además de almacenar calor, se convierte en aislante (evidentemente más por su grosor que por la naturaleza intrínseca del material).

La acumulación de calor (*AQ*) se define por la expresión:

$$AQ = \Sigma(M_i \cdot C_{ei} \cdot T_{mi})$$

- M_i es la masa de cada capa que compone la pared (kg).
- C_{ei} es el calor específico de cada capa que compone la pared (kcal/kg · ℃).
- T_{mi} es la temperatura media de cada pared (℃) en régimen estacionario de transmisión del calor.

Como acontece con casi todas las propiedades físicas, y la *AQ* es una de ellas, tiene su faceta positiva y negativa. Así en el calentamiento de espacios por periodos de tiempo muy cortos (lugares que se emplean de forma discontinua como una sala de conciertos) una *AQ* grande es un problema, mientras que para aumentar el confort de una vivienda es una ventaja, de ahí la importancia de su análisis. La Figura 6.43 muestra un esquema del denominado muro Trombe, que se emplea como acumulador de calor doméstico. Existen infinidad de pantallas (es decir, gran cantidad de elementos externos) para mejor ajustarse a la climatología del lugar.

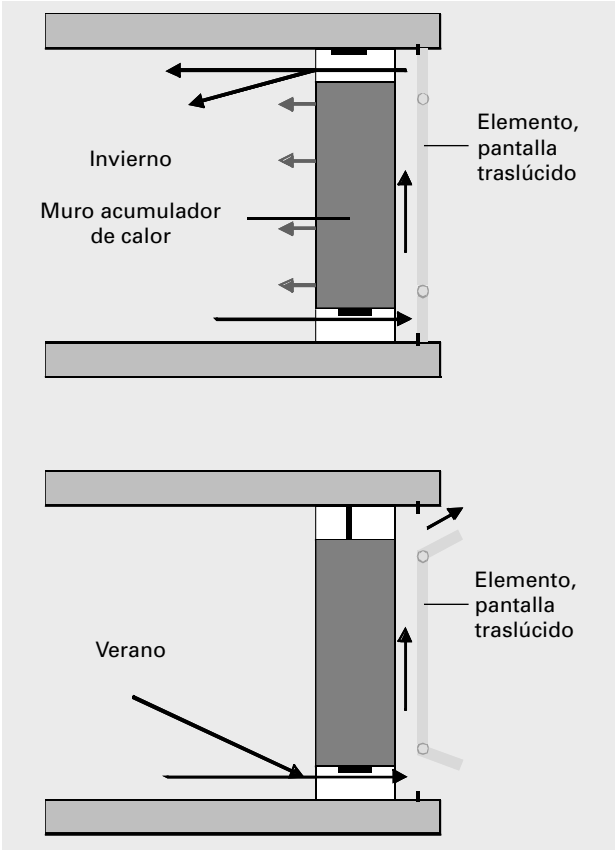


Figura 6.43. Muro acumulador de calor.

Como sea que la acumulación de calor es una de las partidas más importantes de un balance energético, en los procesos térmicos intermitentes, y por lo tanto del consumo energético, será preciso intentar minimizar su incidencia. Para ello se puede actuar sobre:

- *La masa*, o bien la calidad del material que integra la pared, en particular de la primera capa (cara caliente). Si se reduce la masa, la *AQ* desciende pero además un material más ligero suele ser mejor aislante y reducirá el valor de la temperatura intermedia.
- *El tiempo*. Cuanto más lenta sea la etapa de calentamiento más tardará la pared de alcanzar la *AQ* máxima.

La Figura 6.44, permite visualizar la distribución de la temperatura en las paredes de un horno (o bien,

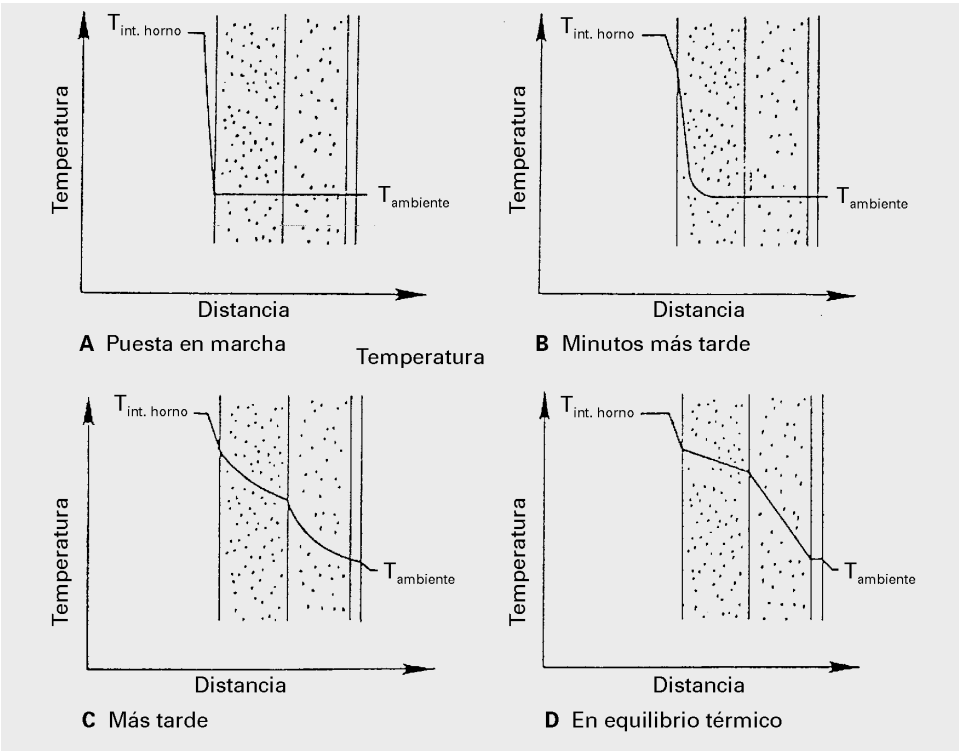


Figura 6.44. Distribución de la temperaturas internas en una pared compuesta en función del tiempo.

hágase la transposición a las paredes compuestas exteriores de una vivienda), donde en A se representa el momento de puesta en marcha del proceso con las paredes frías (obviamente la distribución de temperaturas en el interior de las capas es la inicial y la *AQ* es la misma que la del principio).

Al cabo de unos minutos, y en función de la capacidad conductora o aislante de las paredes, la distribución de temperaturas habrá cambiado poco. Más tarde (detalle C) las temperaturas medias alcanzadas por cada pared son importantes y la *AQ* también.

En la situación de régimen estacionario de transmisión del calor, tiempo infinito, la *AQ* es máxima ya que se han alcanzado los máximos valores de las temperaturas.

11.1. ACUMULACIÓN DE CALOR Y AISLAMIENTO TÉRMICO

El interés de la acumulación de calor con el reciclaje de residuos inorgánicos para la fabricación de materiales densos estriba en la relación existente entre la masa (*M*), o bien la densidad, y su capacidad de acumular calor (*AQ*) de acuerdo con la expresión:

$$AQ = M \cdot Ce \cdot T_e$$

Así desde el punto de vista térmico se puede afirmar que el aislamiento térmico y la acumulación de calor son propiedades antagónicas. Un material que sea denso, conduce el calor y su masa le permite acumularlo.

La Figura 6.45 reproduce un ejemplo de transformación de una pared (A) en un muro acumulador

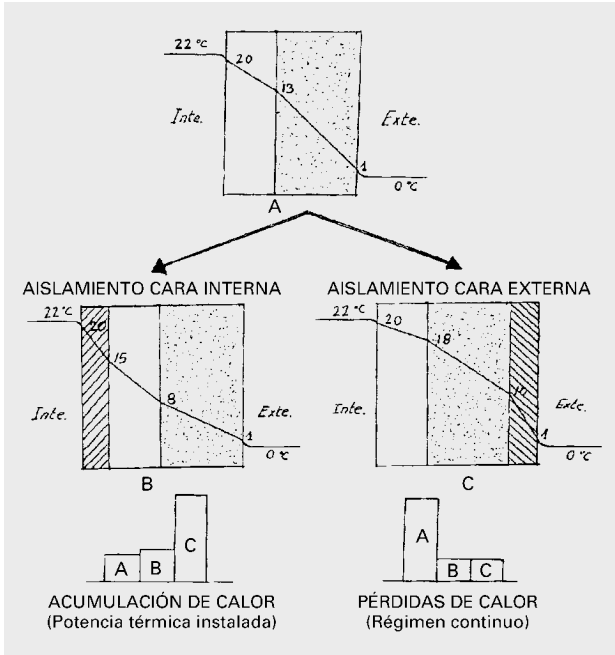


Figura 6.45. Evolución de la acumulación de calor en un muro en función de la situación del aislante.

de calor (C) por el simple hecho de haber aislado la pared original por la cara externa (cara fría). Este proceso se realiza cuando se desea que la pared, además de acumular calor, esté bien aislada. En caso de proceder al aislamiento por la cara caliente (B) el valor de las pérdidas de calor son iguales que en el caso (C) pero la acumulación de calor se verá disminuida. Por ello, en el caso de que el local se deba destinar a calentamientos intermitentes y cortos (una iglesia, una sala de conferencias) la combinación ha de ser del tipo (B) para conseguir una sensación de confort con una potencia térmica instalada reducida.

Lógicamente si la propiedad deseada es el incremento de la acumulación de calor, ésta se puede lograr simplemente con el empleo de paredes de gran densidad. Pero en este caso las pérdidas de calor también serán elevadas.

11.2. CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE CALOR DE LOS MATERIALES

Cada vez se dedica un mayor interés a la denominada arquitectura bioclimática, arquitectura sostenible o, simplemente arquitectura solar que consiste en la búsqueda de soluciones técnicas que permitan la captura, almacenamiento y distribución de la energía solar que incide en un edificio.

En el caso de la técnica de la acumulación, ello se consigue por medio de criterios pasivos (arquitectura solar pasiva) que transforman la energía solar, sin concentrarla, reteniéndola en los muros y cubiertas de gran inercia térmica. Estas estructuras no son más que materiales de gran capacidad de almacenamiento de calor recubiertos de un material que proporcione una superficie mate y oscura con el propósito de minimizar la reflexión de los rayos solares.

Un sistema de ventana traslúcida puede ser una pared compuesta por dos vidrios. La expresión «doble ventana» suele aplicarse a aquella ventana que tiene dos vidrios, separados entre sí una distancia que oscila de 3 a 15 mm y que se ha practicado el vacío entre ellos. Su finalidad es el aislamiento térmico. La corta distancia entre los vidrios impide la creación de una corriente de convección en el caso de no existir vacío. Por tanto el calor se transmite exclusivamente por radiación. Durante las horas de insolación la temperatura superficial del vidrio es muy alta y la tasa de transferencia de calor también, puesto que ésta depende de la cuarta potencia de la temperatura absoluta. Para dar una idea de magnitud, y prescindiendo de los factores de emisividad, si se supone una temperatura en la cara interna del primer vidrio de 60 ℃ y 15 ℃ en el muro, la diferencia de temperaturas absolutas a la cuarta potencia es de 27.945. Admitiendo que durante la noche el muro permanece a 15 ℃ mientras que el vidrio exterior alcanza los 0 ℃, la misma diferencia es de 8.425. Así pues se crea un factor de 3,3. O en otras palabras, el flujo de calor durante las horas de insolación es muy superior al que se pierde durante la noche, por tanto el balance es positivo.

El histograma de la Figura 6.46 muestra los valores de acumulación de calor de diversos materiales de construcción, entre los que se incluyen residuos. Los valores teóricos expresados en kcal/$m^3 \cdot$ ℃ resultan de multiplicar la densidad teórica del material por su calor específico medio.

11.3. APLICACIONES DE LA ACUMULACIÓN DE CALOR

En la industria, los acumuladores de calor llevan siglos funcionando en contraste con las viviendas puesto que, solo hasta hace muy poco se ha sensibilizado a los profesionales de la construcción que debían diseñar los edificios de manera que la iluminación y la calefacción fuesen proveídas, en su mayor parte, por el sol.

11.3.1. Aplicaciones industriales de la acumulación de calor

En muchos procesos térmicos industriales los gases abandonan el horno a elevadas temperaturas, lo que representa un aumento de pérdidas energéticas y ello constituye un elevado consumo energético, por lo tanto se trata de buscar soluciones para recuperar el calor sensible de los gases.

Cuando se trata de acumular calor muchos residuos densos pueden aglomerarse con cementos aluminosos, que son refractarios, para aplicaciones a alta temperatura o simplemente con cementos portland si las aplicaciones son para baja temperatura.

Otra aplicación paralela consiste en la fabricación de materiales refractarios conformados, ladrillos refractarios, para la acumulación de calor a alta temperatura.

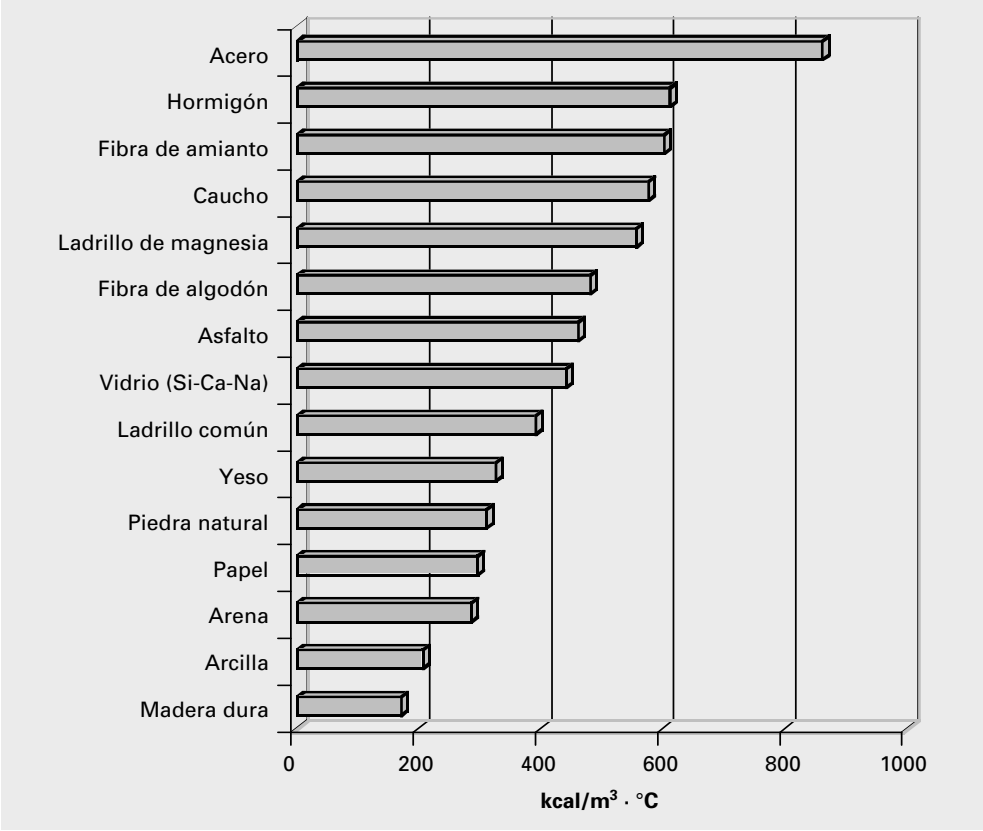


Figura 6.46. Acumulación de calor de diversos materiales de construcción.

La Figura 6.47 representa el principio de funcionamiento de un horno Martin-Siemens. Como sea que el proceso precisa de una temperatura próxima a los 1.600 ℃ es evidente que los gases abandonan el horno a dicha temperatura con la inevitable pérdida de calor. Para paliar dicha pérdida los gases de combustión atraviesan un laberinto construido con material refractario al que ceden su calor sensible. Al mismo tiempo, por otra cámara simétrica que ha sido calentada anteriormente, se hace circular, en sentido contrario, el comburente y, a veces, el propio combustible, con lo que se reduce el consumo energético del horno. Los grandes hornos de fusión de vidrio funcionan de una manera análoga. En general todos los hornos intermitentes que deben evacuar gases a la temperatura de proceso, obedecen al mismo principio de funcionamiento.

Una última aplicación consiste en la fabricación de elementos filtrantes a alta temperatura para gases muy cargados de partículas en suspensión. Esta apli-

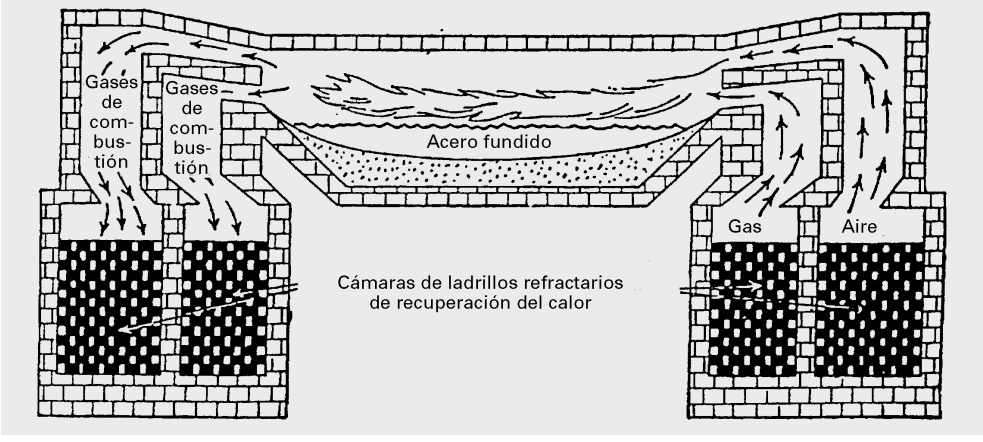


Figura 6.47. Principio de funcionamiento de un horno Martin-Siemens.

cación es muy común en los hornos de fusión de vidrio. En éstos los gases abandonan el horno a una temperatura próxima a los 1.300 ℃ por lo que es preciso instalar un recuperador de calor para aprovechar el calor sensible de los mismos. Los recuperadores son, en la práctica, acumuladores de calor y, por tanto han de tener gran inercia térmica. Una vez los gases se han enfriado razonablemente (alrededor de los 700 ℃) se instala un filtro de fibra cerámica que retiene la mayor parte del material particulado.

11.3.2. Aplicaciones domésticas de la acumulación de calor

En el ámbito doméstico la acumulación de calor por sistemas pasivos se va imponiendo. El ejemplo de la Figura 6.48 muestra un acumulador de calor instalado en una vivienda y construido con piedras y gravas. El conjunto se halla ubicado en los sótanos de la vivienda.

El principio de funcionamiento de estos acumuladores es simple. Durante el día el sol calienta, gracias a la instalación de un primitivo intercambiador de calor, una corriente de aire y un ventilador la impulsa a través del lecho de piedras. Durante la noche se invierte el sentido: el ventilador recircula el aire de la vivienda a través del lecho de piedras. El aire se calienta gracias al calor acumulado en el lecho.

Otro procedimiento, que obedece al mismo principio de funcionamiento, pero con un rendimiento superior, consiste en la exposición al sol de un panel, con una superficie negra para que absorba cerca del 95% de la radiación incidente y la convierta en calor acumulado. El panel se halla construido de hormigón de escorias para que posea una gran capacidad de acumulación de calor. Por su interior circula agua que puede llegar a los 90 ℃. Instalaciones de este tipo, con un dispositivo calefactor de 2 a 5 m^2 en el tejado son frecuentes en EE UU, Israel, Japón, etc., como muestra la parte inferior de la Figura 6.48.

Para el acumulador de calor de lechos de piedras se pueden usar residuos a granel para construir los sistemas de almacenamiento de calor y en el segundo caso, los muros, se deben usar hormigones con un peso específico alto. Ello se consigue, por ejemplo, sustituyendo el árido convencional por escorias metalúrgicas.

Otra aplicación doméstica en alza son los sistemas para la acumulación de calor nocturno y aprovechamiento de la energía acumulada durante el día.

Este sistema es muy común en los lugares donde el precio de la electricidad nocturna es muy barato (Por ejemplo. en los países con gran cantidad de electricidad de origen nuclear. No obstante la tendencia es bastante universal por cuanto las centrales suelen generar durante las 24 horas del día, mientras el consumo se concentra en pocas horas del día).

El principio de funcionamiento, indicada en la Figura 6.49, consiste en una masa de cerámica atravesada por una resistencia eléctrica. Durante las horas nocturnas la masa se calienta por efecto Joule. Durante el día un pequeño ventilador impulsa el aire de la vivienda a través de la masa y ésta le restituye el calor acumulado.

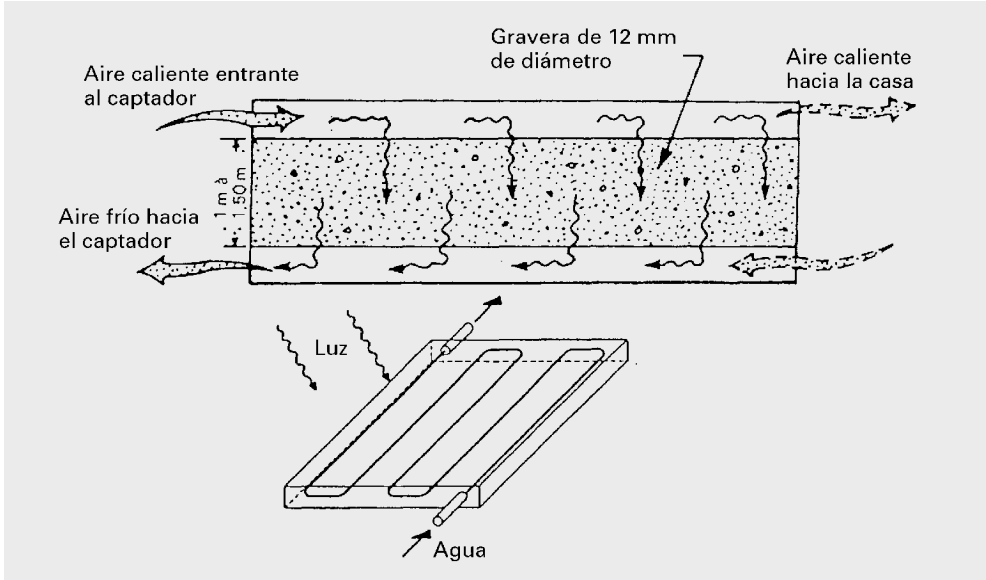
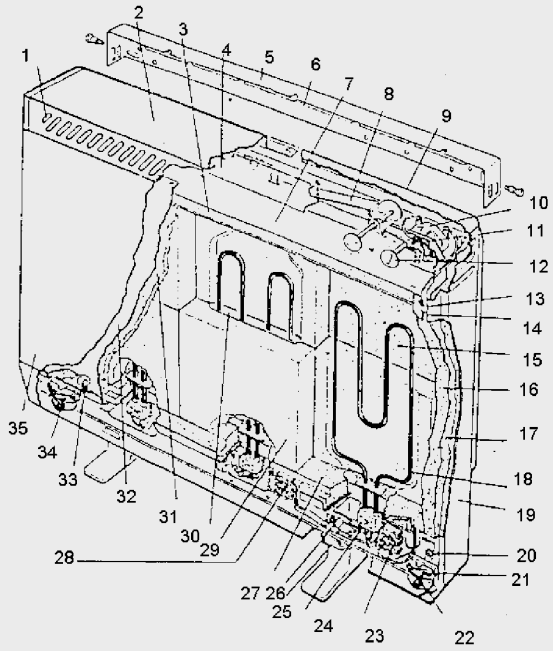


Figura 6.48. Acumuladores de calor domésticos.



1	Rejilla de salida de aire	19	Paneles del extremo exterior
2	Panel superior exterior	20	Borne de toma a tierra
3	Placa superior	21	Sujetacables
4	Tapa de registro	22	Manguito de entrada del cable
5	Dispositivo de fijación a la pared	23	Placa de bornes de alimentación
6	Ranuras para la fijación a la pared	24	Regleta bornes del elemento calefactor
7	Paneles superiores anteriores	25	Patilla de centrado
8	Mecanismo de registro	26	Haz de cables del zócalo
9	Placa soporte de los botones de mando	27	Calorifugado (placa del fondo)
10	Protector térmico	28	Bloque de bornes
11	Regulador de carga	29	Ladrillo refractario
12	Botones de mandos	30	Conductores verticales para el aire
13	Fijación	31	Calorifugado Microtherm (placa delantera)
14	Haz de cables superior	32	Paneles delanteros interiores
15	Calorifugado con Microtherm (placa posterior)	33	Fijación
16	Calorifugado (placa del extremo interior)	34	Manguito de entrada de cables
17	Calorifugado (placa del extremo exterior)	35	Paneles delanteros exteriores
18	Elemento calefactor		

Figura 6.49. Acumulador de calor doméstico eléctrico.

Su relación con la valorización de subproductos estriba en el hecho de que es posible usar ciertos vitrificados fabricados con residuos e incorporarlos posteriormente a la masa cerámica para conseguir una mayor densificación y, con ello una mayor acumulación de calor.

El DVD adjunto, en el punto 9, se muestra información complementaria sobre el consumo eléctrico nocturno.

11.3.3. Calefacción por suelo radiante

En la calefacción por suelo es éste el que radia el calor de abajo hacia arriba, incidiendo sobre los cuerpos sólidos (suelo, muebles, paredes, personas, etc.) elevando su temperatura. La temperatura del suelo es prácticamente la misma que la de la superficie de la habitación, con ello el reparto de temperaturas es uniforme en toda la superficie. Por otro lado la temperatura es muy reducida (de 23 a 20 °C) con lo que no se generan corrientes de aire interiores.

El principio de funcionamiento es el siguiente. Sobre una superficie aislante (de 2 a 5 cm de poliestireno expandido) se coloca una red de tuberías de plástico por donde circulará el agua de caliente. Una vez fijada la distribución de las tuberías se aplica una capa de hormigón (de 6 a 10 cm) denso que embebe las tuberías. Sobre esta capa de hormi-

gón se añade el acabado definitivo (cerámica, parquet, moqueta, etc.). En función precisamente del poder de aislamiento térmico del acabado se fijará la temperatura de circulación del agua caliente. En promedio ésta suele estar comprendida entre 30 y 50 ℃.

Al tratarse de un sistema de calefacción a baja temperatura permite usar energías alternativas como colectores solares o bomba de calor (eventualmente en zonas donde la energía eléctrica es muy barata, como en Norteamérica, se puede emplear esta fuente de energía). Cabe señalar que el sistema tradicional de radiadores o convectores funciona, por lo general, con temperaturas elevadas a 80 ℃ de temperatura de ida y 60 ℃ de retorno. Esto provoca corrientes convectivas que calientan más la parte superior de la habitación que la inferior o intermedia que es la que necesita más nivel térmico. En cambio el suelo radiante trabaja con temperaturas entre 30 y 50 ℃ de ida y 23 y 42 ℃ en el retorno. Todo ello supone un ahorro energético notable y un nivel de confort superior, de ahí su desarrollo.

Desde el punto de vista de la reutilización de residuos, la formulación del hormigón permite la inclusión de cenizas volantes que densifiquen el hormigón y, por tanto, que aumente tanto la conductividad térmica así como la acumulación de calor.

11.4. ALMACENAMIENTO TÉRMICO POR CAMBIO DE FASE

Este apartado se halla a medio camino entre la valorización de residuos y la conservación, ya expuestos en los párrafos anteriores, y el fomento de las energías renovables y pretende dar solución a:

- Diferencia o no coincidencia en el tiempo entre la producción o disponibilidad de energía y el consumo de los sistemas receptores.
- Inercia térmica, también denominada protección térmica.
- Seguridad de suministro energético en zonas claves: hospitales, centros de seguridad, informática, etc.

Dentro del ámbito de las sustancias usadas en el almacenamiento de energía, una buena clasificación es la ofrecida por Abhat, que se resume en la Figura 6.50. En ella se han resaltado los sistemas de almacenamiento basados en el modelo sólido/líquido por la densidad de energía que permiten almacenar.

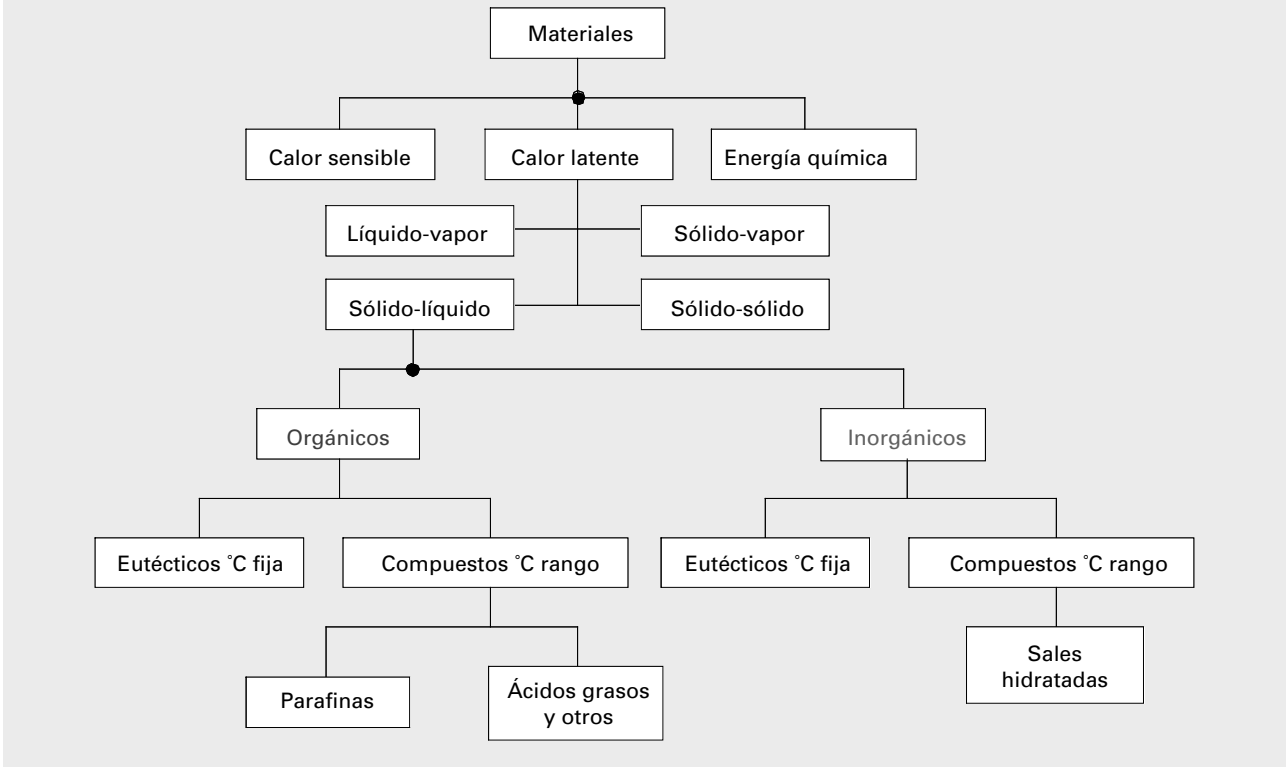


Figura 6.50. Clasificación de materiales para almacenamiento de energía.

Los materiales que se pretenden usar para almacenar energía, ya sean orgánicos o inorgánicos, deben reunir una serie de propiedades:

- Temperatura de cambio de fase adecuada a la temperatura disponible del proceso (Una característica a tener en cuenta es la energía sobrante de un proceso pero que se halla disponible a una temperatura determinada).
- El material debe tener una conductividad térmica lo más elevada posible.
- Alta densidad y poca variación de volumen con el cambio de fase.
- Estabilidad química y que no presente segregación de fases. Que permita un gran número de ciclos.
- Que sea compatible con los otros materiales que integran el sistema.
- Que no sea tóxico, contaminante ni explosivo.

Desde el punto de vista de las aplicaciones térmicas vale la pena diferenciar los materiales con gran inercia térmica y los destinados a acumular calor. En estos últimos se requiere, además de almacenar, que la conductividad térmica sea elevada para restituir el calor de manera rápida. La Tabla 6.38, sintetiza, en líneas muy generales, estas propiedades.

Entre los materiales inorgánicos destacan las sales hidratadas en sus aplicaciones en el ámbito del almacenamiento de energía solar (En este campo las sales hidratadas y ácidos grasos, presentan un campo de almacenamiento de calor a baja temperatura, de 50 a 100 ℃. Pueden ser económicas si son subproductos y tienen las ventajas del bajo nivel de corrosión y economía). Dentro de los materiales orgánicos, y cerca del mundo de los subproductos, destacan las ceras o las parafinas.

Tabla 6.38. Propiedades comparativas de compuestos orgánicos e inorgánicos adecuados para el almacenamiento de calor

	Orgánicos	Inorgánicos
Ventajas	No son corrosivos. Buena estabilidad química. Estabilidad térmica (repetibilidad).	Elevada entalpía de cambio de fase.
Inconvenientes	Menor entalpía de cambio de fase. Baja conductividad térmica. Son inflamables.	Problemas de subfusión y corrosión. Segregación de fases. Poca estabilidad química.

En el campo de la construcción sostenible se han llevado a cabo algunos estudios para la acumulación de calor en residuos densos procedentes de construcción con polietileno de alta densidad que proporciona estabilidad estructural.

11.4.1. Ciclo orgánico de Rankine

Para finalizar este apartado, la Figura 6.51 muestra una aplicación de un fluido orgánico, que sirve como elemento intermedio para transportar el calor entre

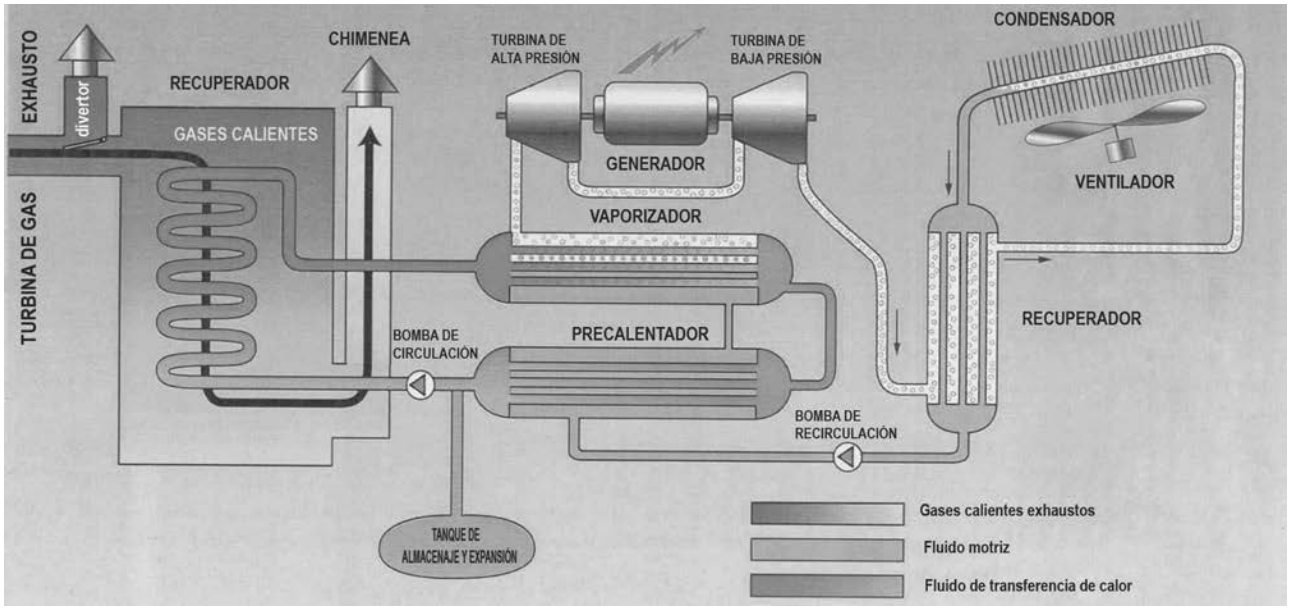


Figura 6.51. Esquema general de generación de electricidad con efluentes de baja temeratura.

un foco caliente y otro frío. El sistema mostrado en la figura se basa en la diferencia de temperaturas entre el agua superficial del mar (foco caliente) y el agua profunda (foco frío). Se ha elegido este modelo puesto que se espera que en un próximo futuro se popularice.

El sistema consta de:

- Un fluido, como puede ser el amoníaco, que gracias a un foco de calor, se evapora a baja temperatura. Se expande en una turbina que genera electricidad.
- A la salida de la turbina el fluido se condensa por efecto del agua fría que es bombeada desde el fondo.

Las aplicaciones de valorización del calor sensible de los gases de escape a baja temperatura son cada vez más frecuentes dado el elevado coste de la energía convencional. Para ello debe usarse fluidos intermedios orgánicos, de ahí la denominación de ciclo orgánico de Rankine. En el ciclo de Rankine convencional, el fluido se hace recircular en un ciclo cerrado reversible, también conocido como ciclo de la máquina de vapor. Este sistema ha abierto un gran abanico de posibilidades al uso de fluidos naturales a baja temperatura, como las aguas termales.

12. Sumideros y valoración del CO_2

En la UE y los EE UU se dedican grandes esfuerzos a desarrollar tecnologías para la captación, secuestro y almacenamiento de CO_2 producido por la combustión de combustibles fósiles. Pese a la gran sustitución de centrales de carbón por otras de gas natural en ciclo combinado, se estima que en el año 2030 se habrá doblado el consumo de carbón correspondiente al 2000. Ello significa que las emisiones de CO_2 van a crecer de tal manera que es urgente descubrir métodos de evitar que este gas se emita a la atmósfera como lo está haciendo de manera incesante en los últimos decenios.

Los expertos calculan que pueden ser necesarios 100.000 años para que los océanos absorban el exceso de CO_2 en la atmósfera. Un grupo de científicos, a partir de los sedimentos extraídos del fondo marino, comprobó que al comienzo de la época conocida como Máximo Termal Paleoceno-Eoceno (PETM), hace unos 55 millones de años, se produjo un cambio abrupto en la «química oceánica». Cuando el CO_2 se disuelve en agua, ésta se torna más ácida y la acidez se va extendiendo desde la superficie hasta las profundidades.

El fenómeno que tuvo lugar en el PETM pudiera deberse a una masiva liberación de metano procedente de depósitos helados en las profundidades marinas que al emerger se oxidó dando lugar a enormes cantidades de CO_2 y generando un efecto invernadero muy intenso. Se calcula que la temperatura media del planeta aumento en unos 5 °C originando cambios dramáticos en fauna y flora, extremo confirmado en fósiles analizados. El estudio, publicado en *Science*, concluye que para que se llegue a una situación similar harían falta unos cuatro billones de toneladas de CO_2, cifra aproximada que coincide con la combustión de todas las reservas de combustibles fósiles de la Tierra.

La Figura 6.52 esquematiza las líneas principales de actuación de los sistemas más convencionales para prevenir el efecto invernadero: secuestro o valorización del CO_2.

El esquema de la Figura 6.52 simboliza el reciclaje del CO_2. Una vez generado como gas de combustión se hace pasar por una torre de absorción donde en contacto con un catalizador se produce ácido carbonoso y, a partir de él se valoriza. Así pues, las líneas prioritarias de investigación son las siguientes:

- Captación pre y postcombustión del CO_2.
- Almacenamiento geológico del CO_2.
- Secuestro químico/mineral del CO_2.

En el estado actual de la tecnología, la captación de CO_2 constituye el 70-80% del coste. Uno de los objetivos es reducir su coste desde las actuales 50-60 €/tCO_2 hasta los 20-30 €/tCO_2 con un rendimiento del 90%.

Los gases de combustión procedentes de las centrales térmicas suelen tener un contenido de CO_2 entre un 10 y un 30% y presión atmosférica. Los análisis económicos mas recientes han demostrado que es posible emplear membranas especiales como elemento de separación (la relación ideal es $CO_2/N_2 > 40$) con un coeficiente de permeabilidad del CO_2 del orden de 100 Barrers.

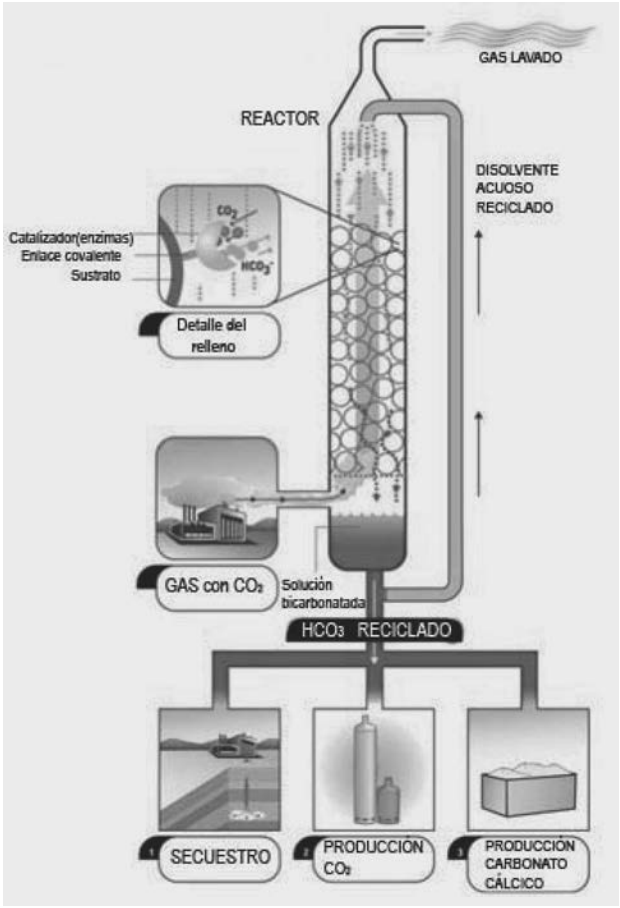


Figura 6.52. Secuestro y valorización de CO_2.

12.1. EL CICLO DEL CARBONO

De forma esquemática, el ciclo del carbono se puede explicar como sigue:

1. Parte del CO_2 atmosférico se disuelve en el agua, siendo absorbido por los organismos acuáticos y pasando a forma orgánica. Parte de este carbono retorna a la atmósfera a causa de los procesos de respiración, mientras que otra parte queda disuelta en el agua.
2. Otra fracción del dióxido de carbono presente en la atmósfera es absorbido por las plantas terrestres durante la fotosíntesis, con lo que el carbono pasa a formar parte de sustancias orgánicas. Una parte es devuelto a la atmósfera durante los procesos de respiración de los seres vivos.
3. Otra parte de los átomos de carbono han quedado retenidos en el subsuelo, transformándose en combustibles fósiles: lignito, carbón, petróleo y gas natural. Cuando estas sustancias se someten a combustión en las centrales térmicas, el carbono se devuelve a la atmósfera en forma de CO_2.

Al menos la mitad de la acción fotosintética del planeta ocurre en el fitoplancton, delicados organismos, que habitan en los primeros 100 metros del océano y usan la luz y los nutrientes disueltos (principalmente compuestos de nitrógeno, fósforo, silicio y hierro) para convertir el CO_2 en carbono orgánico que sirve de alimento a otros animales. Se han realizado ensayos de fertilizar el mar y, se ha comprobado que la masa de fitoplancton aumenta. Esta línea de investigación entra de lleno en el área del secuestro de CO_2.

En la década de 1980 se descubrió una importante reserva de hidrocarburos en el fondo de los océanos, que se denominaron clartratos es decir: fósiles «en caja». La gran cantidad de materia orgánica producida en la fotosíntesis marina se precipita a las profundidades del mar y, en medio anóxico, se va transformando en diferentes hidrocarburos, H_2S, CO y algo de CO_2. Por otra parte, las moléculas de agua sometidas a condiciones tan extremas forman estructuras tubulares (fullerenos) que guardan estos hidrocarburos en su interior (de ahí el nombre de «encajado»), con una densidad media de 900 kg/m^3. El hecho es que, hoy en día, se calcula que el potencial de energía

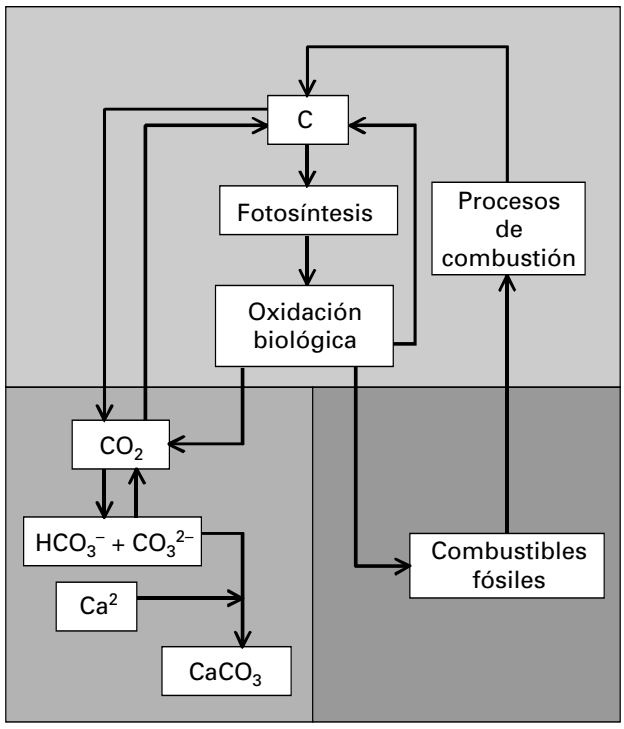


Figura 6.53. El ciclo del carbono.

almacenado en los clartratos es equivalente a la suma del carbón, petróleo y gas natural juntos. El fenómeno formación es parecido a la génesis de los combustibles fósiles pero llevado a cabo en el mar.

El CO_2 se emite a la atmósfera bien por fuentes naturales, como emanaciones volcánicas, respiración de la masa vegetal, incendios forestales y descomposición de la materia orgánica, aparte claro está de las fuentes antropogénicas, que son el objeto de este apartado.

En el caso de la emisión de CO_2, no todos los recursos fósiles son igualmente contaminantes. Como se puede observar en las siguientes reacciones de combustión, para generar la misma cantidad de energía, el carbón (considerado como carbono) es el combustible que desprende más CO_2, seguido de petróleo (entendido como hexano) y gas natural (metano).

- carbón: $10{,}6\,C + 10{,}6\,O_2 \rightarrow 10{,}6\,CO_2 +$ 1.000 kcal
- petróleo: $C_6H_{14} + 9{,}6\,O_2 \rightarrow 6\,CO_2 +$ $7{,}1\,H_2O$ + 1.000 kcal
- gas natural: $4{,}7\,CH_4 + 9{,}5\,O_2 \rightarrow 4{,}7\,CO_2 +$ $9{,}5\,H_2O$ + 1.000 kcal

A la vista de los resultados, una solución puede ser incrementar el uso del gas natural, en detrimento del carbón y del petróleo, en centrales de ciclo combinado en las que, además, la eficiencia energética aumenta considerablemente. Todo ello sin olvidar la aplicación de las energías de origen renovable.

La eficiencia, eficacia o rendimiento energético, representa la relación entre la energía de salida, o energía útil, y la de entrada. En todo sistema, la energía que se obtiene es siempre menor que la de partida, obteniéndose un tipo de energía no deseada. Es decir:

$$\text{Energía de entrada } (E_t) = \text{Energía útil } (E_u) + \text{ + energía no deseada}$$

Por esta razón la eficacia energética de un sistema es siempre inferior a la unidad (o menor que el 100% si se expresa en porcentaje).

$$\eta = \frac{E_u}{E_t} \cdot 100$$

Es interesante llevar a cabo una reflexión sobre la cantidad de carbono existente en la corteza terrestre con relación a la cantidad de oxígeno presente en la atmósfera que, a efectos prácticos, es el preciso para completar las reacciones de combustión. Ello implica que va a disminuir el contenido atmosférico de oxígeno debido a la quema de los combustibles fósiles.

De acuerdo con las estimaciones del profesor J. E. Llebot (UAB), que se reproducen en la Tabla 6.39, la cantidad de carbono total en la corteza terrestre se estima en $7{,}5 \cdot 10^{16}$ toneladas, y se halla distribuido entre el océano, la atmósfera y la tierra.

Tabla 6.39. Distribución de carbono en la Tierra

Compuesto	Toneladas	%
Carbonato cálcico	$3{,}50 \cdot 10^{16}$	46,64
Carbonatos mixtos de Ca/Mg	$2{,}50 \cdot 10^{16}$	33,31
Materia fosilizada	$1{,}50 \cdot 10^{16}$	19,99
Combustibles fósiles recuperables	$4{,}20 \cdot 10^{13}$	0,06
Carbono superficial	$4{,}00 \cdot 10^{12}$	0,01
Materia viva (biosfera)	$5{,}60 \cdot 10^{11}$	0,00
Carbono en CO_2 atmosférico	$7{,}20 \cdot 10^{11}$	0,00
TOTAL	$7{,}50 \cdot 10^{16}$	100,00

Los océanos almacenan carbono de tres maneras diferentes:

- Carbono inorgánico disuelto: iones carbonato y bicarbonato, y CO_2 disuelto, que es el responsable de la acidificación.
- Carbono orgánico disuelto, en forma de moléculas grandes y pequeñas.
- Carbono orgánico: organismos vivos, y fragmentos y restos de plantas y animales muertos.

Se estima que la cantidad de carbono en los océanos es de $37 \cdot 10^{15}$ toneladas. A efectos de su combinación con el O_2 atmosférico, este carbono, siendo la partida más importante, no es significativo.

El contenido de carbono en la litosfera y biosfera presenta mayores incertidumbres. Las estimaciones para determinar la masa de carbono en las plantas dependen del método empleado para clasificar los ecosistemas; no obstante, oscila entre 420 y 830 Gt. El mismo problema surge a la hora de evaluar el carbono almacenado en el suelo orgánico por unidad de volumen, que globalmente se estima en 1.600 Gt ($1{,}6 \cdot 10^{12}$ t).

En las aguas continentales, con exceso de bicarbonato, debido a la meteorización de carbonatos y silicatos, se produce también un flujo de CO_2 a la atmósfera. Mas tarde el gas se disuelve en el vapor de agua de las nubes, ello explica el porque el agua de lluvia tiene siempre carácter ácido, normalmente el pH oscila de 5,5 a 5,7, si bien en el entorno de las grandes ciudades puede alcanzar valores inferiores a 4.

12.1.1. Contaminantes asociados al carbón

Desde el punto de vista de la contaminación atmosférica, los elementos traza de mayor interés son aquellos que pueden ser emitidos con los gases de combustión de las centrales térmicas u otras instalaciones que consuman carbón, en particular las que se emiten en fase gas o son extremadamente difíciles de retener. De todos ellos el mercurio es, sin duda, el que origina mayor preocupación.

Los elementos que se encuentran en cantidades inferiores a 0,1% se denominan traza y, en el caso del carbón son As, Sb, Be, Cd, Co, Pb, Mn, Hg, Ni, Cr y Se. Es decir, metales pesados y además tóxicos. En la central térmica su comportamiento será, básicamente una función de su volatilidad, como indica la Figura 6.54.

En los carbones de uso industrial el mercurio se encuentra en diversas concentraciones y formas de combinación, siendo las más frecuentes los sulfuros e intercambiado en las arcillas. Las concentraciones son generalmente inferiores a 1 ppm con contenidos medio de 0,1 ppm. Durante la combustión del carbón las especies de mercurio, en más de un 90%, se evaporan transformándose fundamentalmente en Hg^0, HgO y $HgCl_2$ y pasan a la corriente de gases. La forma más segura de retención es la adsorción en carbón activo.

Según la USEPA, más del 40% (Una central téricoa de 200 MW puede emitir mas de 250 kg de Hg al año) de las emisiones de mercurio en EE UU procede de las centrales termoeléctricas, por esta razón este país publicó, en 2005, la «*The Clean Air Mercury Rule*» y constituye el primer país que se halla trabajando para regular estas emisiones. El segundo foco emisor es la producción de cemento y en tercer lugar las emisiones en los vertederos.

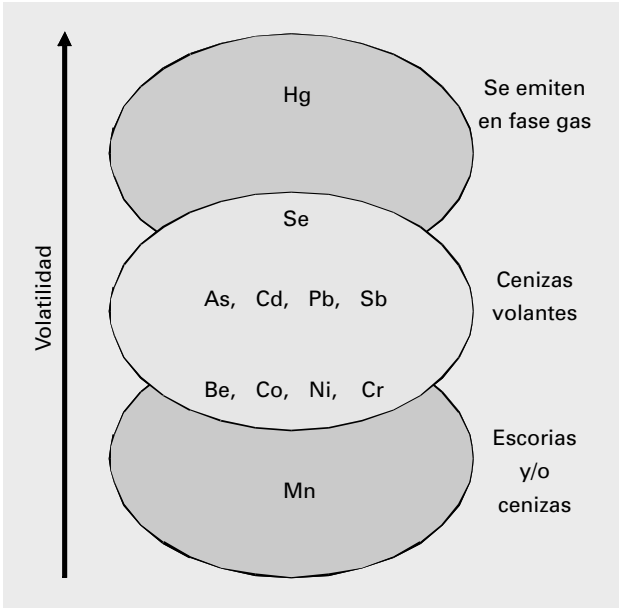


Figura 6.54. Destino de los elementos traza en la combustión del carbón.

12.2. ALMACENAMIENTO DE CO_2. SUMIDEROS MINERALES

En 2005 existían una serie de proyectos para almacenar CO_2 en el subsuelo. De acuerdo con el Protocolo de Kyoto, las multas previstas para las empresas que se excedan en las emisiones de CO_2, pueden sobrepasar los 40 €/tCO_2. De ahí el interés en buscar soluciones técnicas que permitan abaratar este coste. Por ejemplo, el dióxido de carbono supercrítico es líquido y tiene unas propiedades de disolvente excepcionales y ello permite su «enterramiento» es forma bastante asequible.

El almacenamiento de CO_2 en formaciones geológicas se basa en su incorporación como fluido en la porosidad de la formación. Concretamente hay tres tipos de formaciones geológicas en estudio: los acuíferos profundos (normalmente salinos), los campos petrolíferos de petróleo y gas y capas de carbón cuya explotación no es rentable económicamente. La Tabla 6.40 resume estas posibilidades.

El almacenamiento a través de la infiltración del CO_2 en capas minerales se encuentra en desarrollo

Tabla 6.40. Capacidad de las formaciones geológicas para almacenar CO_2 (IEA, 2004)

Formaciones geológicas	Capacidad global	
	Toneladas CO_2	% sobre total emisiones CO_2 (2000-2050)
Campos petrolíferos y de gas natural próximos al agotamiento	$920 \cdot 10^9$	45%
Lechos de carbón no explotables	$> 15 \cdot 10^9$	> 1%
Acuíferos salinos profundos	$800\text{-}10.000 \cdot 10^9$	40-500%

experimental ya que el consumo energético es muy elevado.

El almacenamiento en cavidades profundas es actualmente poco probable debido a la dificultad de conocimiento geológico de las mismas y a la limitación que supone la cantidad de gas que se podría almacenar.

Al margen de los aspectos ambientales, se considera que muchas de las tecnologías que van a surgir estimuladas por moderar la emisión de gases de efecto invernadero, van a generar créditos de carbono suficientes para hacerlas económicamente rentables. En los siguientes apartados se citan algunas de las más representativas.

12.2.1. Centrales termoeléctricas de León y Vattenfall

En la localidad española de Ponferrada (León, España) el CIEMAT tiene previsto desarrollar una planta de generación de energía eléctrica, en ciclo de Rankine, de 5 MW quemando carbón local. La combustión se llevará a cabo con aire enriquecido, para disminuir la masa de gases y los procesos de captura. Los gases se inyectarán a alta presión en el subsuelo con una tecnología que hace tiempo se emplea en los EE UU en los pozos de petróleo. Se estima que el coste de almacenamiento puede rondar los 30 €/tCO_2.

La empresa energética alemana Vattenfall instalará en la localidad de Spremberg una termoeléctrica de 30 MW de potencia consumiendo lignito local que trabajará en la modalidad de oxi-combustión (aire enriquecido, prácticamente oxígeno puro mezclado con gases de combustión recirculados) y no emitirá CO_2 a la atmósfera. Los gases de combustión serán reinyectados en la mina agotada.

12.2.2. Almacenamiento en depósitos de gas

Francia se ha propuesto demostrar que unas cubetas geológicas como las de Lacq, que albergaron durante millones de años gas natural, deben ser capaces de servir ahora para confinar dióxido de carbono. En concreto los antiguos yacimientos de Saint-Faust, formados en el jurásico superior y situados a más de 2.700 metros de profundidad, están hoy día completamente agotados, y contienen un acuífero más o menos activo según los lugares. Su capacidad conjunta de retención de CO_2 líquido (supercrítico) se acerca a los 200 Mm^3. Cuando se terminen el resto de pozos, mas allá del 2020, la capacidad de almacenamiento total puede superar los 800 Mm^3, cifra respetable si se tiene en cuenta que una central de ciclo combinado de gas de 400 MW(e) genera 1,24 Mt CO_2/año, que en forma de CO_2 supercrítico equivale a un volumen de 1,09 Mm^3/año. Es decir, esta supuesta central de ciclo combinado tardaría 643 años en llenar la cubeta.

El coste de bombeo de CO_2, en estado líquido, hoy por hoy es importante pero menor que el adecuar la impermeabilización de los pozos. En el caso concreto del citado yacimiento se ha tenido que llevar a cabo un estudio previo y diseñar una instalación para la separación del CO_2 y el H_2S del gas natural. En este yacimiento el gas natural contiene un 15% de H_2S y un 10% de CO_2.

En una línea semejante, Noruega está estudiando la posibilidad de la inyección de CO_2 en los pozos de petróleo agotados del Mar del Norte. Se calcula que su capacidad de almacenamiento equivale al CO_2 producido por el sector energético europeo durante 60 años.

12.3. SISTEMAS ORGÁNICOS DE CAPTURA DE CO_2

Las turberas, depósitos de turba, son ecosistemas formados fundamentalmente por esfagnos (musgo de la familia de las Sphagneceae) en descomposición y son grandes sumideros de CO_2. La explotación de turba como combustible (la turba es una acumulación de vegetales en descomposición que se considera el primer paso para la formación del carbón. Químicamente tiene 45-60% C, 30-40% O y 5-10% de H, con un PCI entre 3.000 y 5.000 kcal/kg), su uso para horticultura y su progresiva desaparición por la implantación de cultivos forestales y pastizales sobre las turberas han provocado que más de 35 millones de hectáreas de estos ecosistemas hayan desaparecido en tan solo medio siglo. Por esta razón su venta está restringida y, en algunos países prohibida.

El ejemplo más típico de sumidero orgánico es la ceración de nuevos bosques. Por término medio se calcula la fijación de CO_2 puede alcanzar las 20 toneladas por hectárea y año. La mayor compañía eléctrica japonesa, TEPCO, ha plantado 3.000 hectáreas de eucaliptos (árbol de rápido crecimiento) en Tasmania (Australia) que producirán 130.000 toneladas de carbono de crédito a descontar de las crecientes emisiones de CO_2 en Japón.

Recientemente, científicos del Instituto Max Planck de Física Nuclear de Alemania, han descu-

bierto que las plantas emiten metano (gas de efecto invernadero más de veinte veces más intenso que el CO_2) y en cantidades nada despreciables. Se calcula que este hidrocarburo puede contribuir en más de un 10% de la cantidad total de metano de origen orgánico generado en el planeta. Todavía no son bien conocidos los mecanismos pues no era de esperar que, en presencia de oxígeno, las plantas emitieran metano. Los científicos han descartado la presencia de bacterias generadoras de metano en las plantas y han demostrado que la emisión de metano varía con la luz solar y un incremento de 10 ℃ duplica la generación de metano.

El descubrimiento también explica los misterios de las grandes bolsas de metano detectadas por los satélites sobre las selvas tropicales. La disminución de la cantidad de metano en la atmósfera en la última década del siglo XX cuadra bien con los ratios de deforestación de este periodo.

Todo ello hace replantear ciertas estrategias como la de potenciar al máximo la reforestación, en particular en zonas tropicales, para la absorción de CO_2 si, a la vez, la biomasa desprende CH_4 de mayor efecto invernadero.

12.3.1. Gestión energética sostenible del CO_2

La UE esta propiciando programas y ayudas a la generación de energía eléctrica a partir de plantas leñosas de rápido crecimiento. La razón estriba en que el CO_2 emitido por la combustión de los vegetales es neutro, es decir, la biomasa va a la central de generación de electricidad y los gases emiten el CO_2 a la atmósfera que es de nuevo absorbido por el vegetal. Las primas procedentes del uso de la biomasa pueden llegar a doblar las otras subvenciones.

En el ejemplo que propone la Tabla 6.41, las dos centrales producen la misma energía eléctrica. La primera con biomasa en un ciclo de Rankine, mientras que la segunda lo hace con gas natural en una central de ciclo combinado. Es evidente que la emisión unitaria de CO_2 por unidad de energía producida es más del doble en el caso de la biomasa pero, también es cierto que el CO_2 de la central de gas contribuirá enteramente al efecto invernadero mientras que la de biomasa no genera efecto invernadero si se planta biomasa por el mismo valor. En teoría cada tonelada de biomasa fija 0,68 toneladas de CO_2.

En la actualidad los valores de la Tabla 6.41, en instalaciones de demostración se han mejorado pues-

Tabla 6.41. Emisiones de CO_2 comparadas

	Biomasa	Gas natural	
PCI	5,65	13,72	kW/kg
Rendimiento conversión	33%	51%	
Energía eléctrica	1.535	1.535	kW (eléctricos)
CO_2 emitido	11.733	4.908	t CO_2/año
Emisión unitaria	0,956	0,400	t CO_2/MW (eléctrico)
Agua líquida recuperada	1,4	0	t H_2O/MW (eléctrico)

to que se puede gasificar la biomasa, introducir el gas de síntesis en una turbina de gas y en ciclo combinado producir más electricidad, con lo que el rendimiento mejora notablemente. Además el tratamiento de los gases supone la condensación del agua presente, tanto la de humedad como la procedente de la combustión, con lo que se valoriza también el agua (y en una cantidad nada despreciable. La cantidad de agua que aparece en la tabla solo hace referencia a la combustión y no se tiene en cuenta la de humedad, que puede ser muy importante) y no se emite a la atmósfera en forma de vapor (no hay que olvidar que el vapor de agua es el principal gas de efecto invernadero).

La condensación del agua de la biomasa viene, en cierta manera a contradecir los estudios del profesor R. Jackson de la Universidad de Duke y publicados en la revista *Science* de que la plantación masiva de árboles para vender bonos de carbono, empobrece el subsuelo ya que precisa agua y saliniza el terreno. Ello será cierto si no se aplica una valorización hídrica como la expuesta anteriormente. Es evidente que la práctica intensiva de plantar para absorber CO_2 es limitada, puesto que puede contribuir como máximo a reducir de 40 a 70 ppm las concentraciones de CO_2, que se hallan, en la actualidad, en 360 ppm. Es decir esta actividad puede «atrapar» entre un 10 o 20% las emisiones actuales de dióxido de carbono, cifra poco relevante en el conjunto mundial.

12.3.2. Otros sistemas de captura orgánicos de CO_2

El Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Almería (España) con la ayuda del Ministerio de Medio Ambiente ha desarrollado un sistema que consiste en una red de microalgas que

transforma los contaminantes de efecto invernadero (CO_2, SOx o NOx) en biomasa verde. Una vez desarrollada esta biomasa se puede usar como combustible puesto que tiene un poder calorífico similar a la madera o el carbón. Este trabajo se enmarca en el proyecto «Eliminación de CO_2 de gases de escape acoplada a la generación fotosintética de exopolisacáridos por cianobacterias».

Las microalgas son seres unicelulares que viven en medio acuático, tanto marino como fluvial, fabrican materia orgánica aprovechando la energía de la luz y necesitan CO_2 para crecer y producir biomasa. La tecnología, patentada, consiste en la depuración de gases de combustión mediante un equipo de absorción. Los contaminantes son retenidos por la fase acuosa que, más tarde es introducida en un reactor biológico con microalgas, donde los contaminantes son absorbidos por la microalgas para la generación de biomasa.

12.3.3. Fotosíntesis artificial para generar hidrógeno

Biólogos del Imperial Collage de Londres, han establecido la secuencia precisa de acontecimientos que desencadenan el proceso de la fotosíntesis. Esta es la primera vez que se analiza con extrema precisión el proceso desde la captación de los fotones por la clorofila hasta su utilización por las moléculas, a base de manganeso, para transformar las moléculas de agua en protones, electrones y oxígeno.

El descubrimiento, publicado en la revista *Science*, abre la posibilidad al desarrollo de plantas artificiales con la intención de construir «industrias fotosintéticas» para producir hidrógeno a partir del agua a la vez que se absorbe el CO_2.

En el sector de la automoción el consumo crece un 2% anualmente y acapara el 45% de los derivados del petróleo. La eficiencia de los motores de combustión interna se considera poco mejorable en el estado actual de la tecnología; por este motivo el hidrógeno y las pilas de combustible se perciben como una gran solución para el ahorro energético de este sector y, sobre todo y si el combustible proviene de fuentes renovables, para la reducción de emisiones contaminantes. Las soluciones alternativas derivadas de la pila de combustible no se desarrollan de manera masiva por la dificultad y coste de obtener hidrógeno. El proceso descrito, ahora en fase experimental, abre una vía de solución. La Figura 6.55 muestra el esquema representativo de la función clorofílica.

El Instituto de Estudios Avanzados Solares de Colonia (Alemania) tiene una línea de investigación muy avanzada para la producción de hidrógeno a partir de la radiación solar una vez el rayo se refleja en un espejo parabólico, es concentrado y enviado a un reactor, capaz de producir una temperatura próxima a los 3.000 ℃.

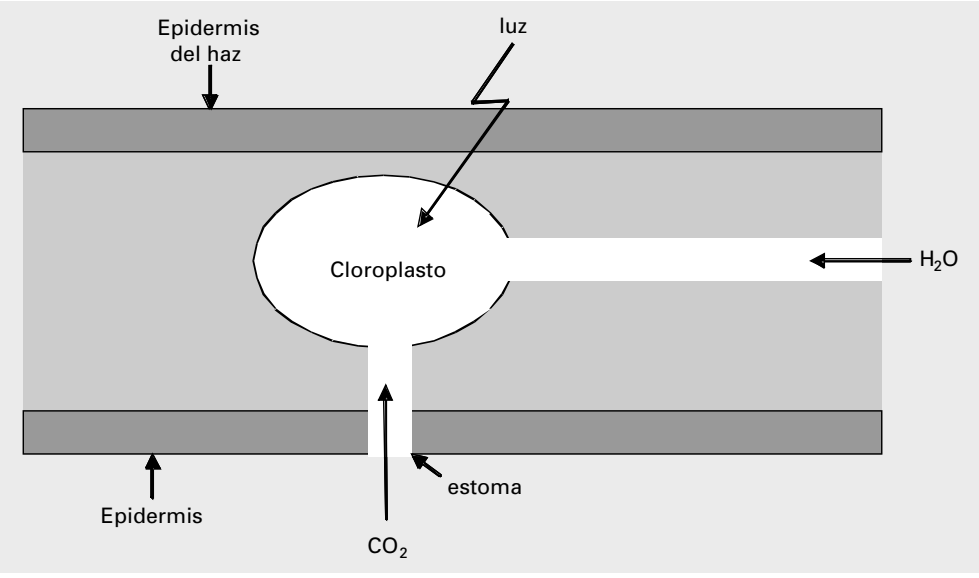


Figura 6.55. Esquema de la función clorofílica.

Bibliografía

ALFARO, I. *et al.* El óxido de aluminio reciclado. *Residuos*, 1998, núm. 41.

ALFARO, I. *The reuse and recycling of contamined soil*. CRC Press LLC, 1997.

ALONSO, J. L. *Estudio fisicoquímico y técnico de diversos tipos de cenizas volantes y su empleo como material de construcción*. Labor. MOPU, Madrid, 1966.

ALONSO, J. L. *Orígenes, tipos y caracterización de las cenizas volantes*. CEDEX (Laboratorio Central de Estructuras y Materiales). 1989.

ASINEL. *Aplicaciones de las cenizas volantes en el campo de la construcción. Experiencia española*. Instituto Eduardo Torroja. CSIC. Madrid, 1991.

AZIZ, M. *et al.* Lightweight concrete using cork granules. Pos.: International Conference on Materials of Construction for Developing Countries. Bangkok. Vol. I, 1978.

BARCELÓ, G. *La energía en la edificación: Política energética y ahorro de energía*. Editorial Index. Madrid, 2004.

BIJEN, J. et al. Contribution of powder coal fly ash to concrete properties. En: *Waste materials in contruction*. Elsevier Science Publishers BV. Amsterdam, 1991.

BONAVETTI, V. L. *et al.* Cementos compuestos elaborados con puzdana natural y escoria granulada de alto horno. *Material de Construcción*. 2006, Vol. 56, 283.

BRADBURY, H. W. The use of fly ash in pre-blended cements. *Silicates Industriels*, núm. 12, 1982.

BREDIN, N.; CARRASCO, F., y HEITZ, M. Emisión y dispersión atmosférica de metales al valorizar neumáticos usados en la fabricación de cemento. *Afinidad*, 477 (IOS).

BUCK, A. D. Recycled concrete. *Miscelleneous pape*r C-72-14. US Army, 1972.

Carrasco, F. et el Valorización de residuos en la industria cementera. *Ingeniería Química*, Febrero, 2003.

CASTRO, M. J. Cementos que contienen 20% y 30% de cenizas volantes de Puentes de García Rodríguez y de Ponferrada. *Materiales de Construcción*, 1980, núm. 179.

CLEGG, P. N*ew low-cost sources of energy for the home*. Garden Way, 1975.

COLLINS, R. J. et al. *Technology for use of incinerator residue as highway material*. FHWA/RD, 1977.

ELIAS, X. *Curso sobre incineración de residuos sólidos, líquidos y hospitalarios*. México, 2002.

ELIAS, X. Materiales cerámicos para la construcción fabricados con lodos de estaciones depuradoras: Ecobricks. Conferencia anual ATEGRUS 1994, Madrid, Junio 1994, *Libro de conferencias*, 1994, pág. 89-101.

ELIAS, X. y J. GAYA (1994). La ceramización como técnica de recuperación de suelos contaminados. *II Congreso Internacional de Suelos Contaminados*, Vitoria-Gasteiz, Septiembre 1994, volumen I, págs. 251-254.

ELIAS, X. *Empleo de materiales cerámicos en construcción*. Esc. Tec. Sup. Ing. Caminos de Barcelona, 1994.

ELKHADIRI, I. *et al.* Obtención de cementos belíticos de sulfoaluminatos a partir de residuos industriales. *Materiales de Construcción*, 2003, n.º 53.

FERNÁNDEZ, C. *et al.* Posibilidades de reciclado de las cenizas volantes de la combustión del carbón en forma de placas usadas en la protección pasiva contra el fuego. *Residuos*, 2004, núm. 74.

FORTEZA, R. *et al. Propiedades físicas y químicas de las escorias resultantes de la incineración de residuos sólidos urbanos*. RETEMA (Medio Ambiente) 2002.

FRÍAS, M. *et al.* Propiedades de la escoria de SiMn como material puzolánico en la fabricación de cementos portland. *Materiales de Construcción*, 2005. Vol. 55.

FROHSNSDORFF, G. *Fly ash cements and concretes: technical needs and opportunities*. US Department of Comerce. NBS. NBSIR 81.

GARCÍA, L. E. *et al.* Uso de la escoria de cobre en el proceso de fabricación de clínquer para cemento portland. *Materiales de Construcción*, 2006. Vol. 56, 281.

GOODWIN, R. W. Utilization aplications of resource recovery residue. *Procedings. First US Conference of MSW Management*. DC (june 1990).

GOUMANS, J. J. J. M. *et al. Waste materials in construction*. Elsevier. Amsterdam, 1995.

GROOT, G. J. et al. Characterization of the leaching behaviour of intact products. PETTEN, Países Bajos, 1990.

HAYNES, J. y LEDBETTER, W. B. *Incinerator residues in bituminous base construction*. FHWA/RD, 1976.

JACKSON, D. R. *Evaluation solidification residue from municipal solid waste combustors*. US EPA. February, 1990.

JARRIGE, A. *Les cendres volantes. Proprietés. Application industrielles*. Eyrolles. París, 1971.

JOSHI, R. C. *Pozzolanic activity in synthetic fly ashes*. Amer. Ceram. Soc. 73 Annual Meeting. Chicago, 1971.

KOSSON, D. S. *et al.* A comparation of solidification / stabilization process for treatmnet of municipal waste combustion residues. Part II. En: *International conference of MSW*. Tampa. Florida, US, 1991.

LLEBOT, J. E. *El canvi climàtic*. Monografies de Medi Ambient. Generalitat de Catalunya. Barcelona. 1997.

MALOLEPSZY, J. et al. The granulated foundery slag as a valuable raw material in the concrete and lime-sand brick production. En: *Waste materials in construction*. Elsevier Science Publishers BV. Amsterdam, 1991.

MULDER, E. *The leaching behaviour of some primary and secondary raw materials used in pilot-scale road bases*. Apeldoorn, Países Bajos, 1990.

MONRÓ, G. *et al.* Plan de prevención y reducción de residuos peligrosos en la industria de baldosas cerámicas esmaltadas. *Revista Cerámica Información*, 2006, núm. 337.

OFICEMENT. *Combustibles alternativos en la fabricación de cemento*. Madrid, 1998.

OTEIZA, I. *et al.* Inertización y valorización de polvos de lijado de barnices procedentes de residuos de la industria de la madera. *Revista Materiales de Construcción*, abril-junio 2006. Vol. 56.

PUERTA, F. *et al*. Residuos ceramicos para su posible uso como materia prima en la fabricación de clinquer de cemento Portland: Caracterización y activación alcalina. *Materiales de Construcción*, 2006. Vol. 56, 281.

PUERTA, F. *et al*. Morteros de escoria activada alcalinamente reforzados con fibra de vidrio R. Comportamiento y propiedades. *Materiales de Construcción*, 2006. Vol. 56, 283.

SHOTTS, R. O. Waste glass as an ingredient of Lightweight agregate. Pos: *Material Waste Utilization Symposium*. Chicago, 1972.

SLOOT VAN DER, H. *et al.* Waste / soil interaction studies: The leaching of molybdenum from pulverizad coal ash. En: *Flue gas and fly ash*. Elsevier. Amsterdam, 1989.

SWAMY, R. N. *et al. New concrete materials*. Vols. 1 y 3. Surrey University Press. 1986.

SYNDER, R. R. *Evaluation of fused incinerator residue as a paving material*. FHWA/RD, 1980.

TOGNON, G. Combined lime and specific surface area of the hydration products of lime-puzzolana and lime-fly ashes mixes. *Proc. Sympos. Mater. Res. Soc*. 145.154. 1997.

US EPA. Characterization of MSC ashes and leachates from MWS landfils, monofils and co-disposal sites. Office of Solid Waste. (October 1987).

WILES, C. C. The USEPA. Municipal waste combustion residue solidification / stabilization program. *Proceedings of 17 Annual conference of hazardous waste research symposium*. Cincinnati, OH, 1991.

YAÑEZ, G. *La energía solar en la edificación*. Ministerio de la Vivienda. Madrid, 2002.

ZALBA, B et al. Almacenamiento térmico mediante cambio de fase. *Ingeniería Química*, 2002. Octubre.

Residuos vitrificables

7

Xavier Elias

ÍNDICE

1. Residuos vitrificables 431
1.1. Naturaleza vítrea..... 431
1.2. La formación del vidrio..... 431
1.3. Constitución de los vitrificados..... 434
1.4. Propiedades de los vitrificados durante la fusión..... 437
1.5. Propiedades de los vitrificados a temperatura ambiente..... 440
2. Inertización de residuos por medio de la vitrificación 442
2.1. Formulación de un vitrificado 443
2.2. Vidrios, fibras, esmaltes, vitrocerámicos y vitrificados..... 446
2.3. Acabado de los materiales vitrificados..... 450
2.4. Textura y formulación de un vitrificado.... 453
3. La vitrificación como tecnología industrial .. 454
3.1. Tipos de vitrificadores..... 455
3.2. La lixiviación de los productos vitrificados. 458
3.3. Vitrificación superficial o total..... 459
3.4. Limitaciones de la vitrificación..... 460
4. Vitrificación con residuos 461
4.1. Producción de vitrificado valorizable a partir de residuos de amianto 461
4.2. Utilización de las arenas de fundición en la vitrificación 462
4.3. Vitrificación de cenizas volantes..... 462
4.4. Vitrificación de polvos de filtros..... 465
4.5. Reutilización de vidrios especiales por vitrificación 465
4.6. Posibilidades de valorización de diversos residuos de la industria metalúrgica a partir de la vitrificación..... 467
4.7. La recuperación de metales de los catalizadores 471
4.8. Vitrificación de cenizas de biomasa..... 472
4.9. Vitrificación de fangos de EDAR..... 473
4.10. Vitrificación de residuos galvánicos 476
4.11. Vitrificación de residuos de minería 477
5. Vitrificación de materiales radioactivos..... 479
5.1. Vitrificación de residuos de alta toxicidad. 481
5.2. Residuos de alta y media intensidad..... 481
5.3. Vitrificación de residuos radioactivos 483
5.4. Naturaleza de los vidrios para residuos radioactivos..... 485
5.5. La gestión de los residuos radiactivos de alta actividad..... 487
6. Aspectos energéticos de la vitrificación..... 488
6.1. Estructura del balance térmico de un vitrificador..... 488
6.2. Comparación de sistemas de vitrificación. 492
7. Aspectos ambientales de la vitrificación..... 492
7.1. Emisiones de NO_x..... 493
7.2. Emisiones de material particulado 495
7.3. Emisiones de carácter ácido 497
7.4. Limites de emisión y depuración de gases. 498
7.5. Monóxido de carbono y otros contaminantes 499
7.6. La emisión de SO_x..... 500
7.7. Los metales..... 501
7.8. Vitrificación continua o intermitente..... 501
7.9. Movilidad de los elementos..... 503
8. Vitrificación por plasma 504
8.1. El plasma y el tratamiento de residuos..... 504
8.2. Otras posibilidades del plasma como herramienta para el reciclaje 507
9. Vitrificación *in situ* 508
9.1. Vitrificación y tratamiento de suelos..... 509
10. Los vitrocerámicos 510
10.1. Microestructura y propiedades de los vitrocerámicos..... 511
10.2. La resistencia de los vitrocerámicos al choque térmico..... 512
10.3. Vías de producción de vitrocerámicos.... 513

10.4. Vesiduos empleados en vitrocerámicos... 514
11. Aspectos técnicos y económicos ligados a la vitrificación 515
11.1. Coste de vitrificación. sistema eléctrico y de gas..... 516
12. Aplicación de la de vitrificación al tratamiento de sedimentos 517
12.1. Cantidad y naturaleza de los sedimentos acumulados..... 518
12.2. Problemática ambiental asociada a los lodos sedimentados 519
12.3. Distintos métodos de tratamiento de los lodos procedente de sedimentos..... 520
12.4. El proceso propuesto para la valorización de los sedimentos de Flix 528
12.5. Destino del vitrificado..... 530
12.6. Implicaciones económicas y ambientales . 530
Bibliografía..... 531

RESUMEN

Existen muchos residuos que debido a su caracterización como materia tóxica y peligrosa, la vitrificación constituye una excelente tecnología para su reciclaje ya que además de ser respetuosa con el medio ambiente, garantiza la inserción del compuesto peligroso en el seno de una matriz vítrea de donde no puede salir.

La vitrificación como proceso térmico de tratamiento de residuos cada día va adquiriendo más relevancia en el campo de la valorización, en especial como solución a los residuos secundarios de los procesos térmicos.

La vitrificación, a lo largo del capitulo, se analiza desde el punto de vista de proceso consumidor de energía y posible contaminante ambiental si no se toman las debidas precauciones.

Al final de capítulo se añade un ejemplo de valorización de sedimentos, por medio de la vitrificación, a la vez que se establece un foro de debate sobre las posibles alternativas de tratamiento.

1. Residuos vitrificables

La vitrificación constituye una tecnología muy apropiada para el tratamiento de residuos altamente tóxicos. De hecho los expertos coinciden en que se trata de la tecnología más segura para la inertización de esta clase de residuos.

Los residuos aptos para la vitrificación deben ser de naturaleza inorgánica al cien por cien (si bien como se explicará, existen sistemas que permiten tratar compuestos orgánicos por vitrificación) y, para que el sistema resulte económicamente atractivo, los residuos deben ser de toxicidad elevada, puesto que ello lleva implícito un coste de tratamiento alto.

Una aplicación particular dentro del campo de tratamiento de suelos contaminados, lo representa la técnica de vitrificación *in situ*. Ésta consiste en vitrificar un terreno para inertizar los contaminantes inorgánicos presentes y destruir los orgánicos, a base de aplicar una gran cantidad de energía, que se lleva a cabo mediante la inserción de electrodos en el terreno contaminado, usando la electricidad como medio de fusión. Dicha tecnología es utilizada para la descontaminación de terrenos donde se hayan producido fugas de productos químicos.

De las dos variantes de la vitrificación, el texto relega a un segundo lugar el sistema de vitrificación *in situ* y se concentra en la técnica convencional, por cuanto ésta variante permite el reciclado de residuos para transformarlos en material de construcción.

1.1. NATURALEZA VÍTREA

Un vidrio suele definirse como un «líquido subenfriado de viscosidad infinita». Es decir, a temperatura ambiente tienen apariencia de sólido proporcionada por su rigidez mecánica derivada del extraordinario aumento de viscosidad de la masa fundida, pero no deben considerarse como tales, aunque desde el punto de vista mecánico los vidrios se comportan como sólidos, ya que poseen una estructura amorfa y, por tanto, carecen de la estructura cristalina que caracteriza y define al estado sólido.

Esta definición encierra una inexactitud ya que no debe aplicarse el sustantivo líquido a los vidrios, pues estos no se encuentran en equilibrio interno, mientras que los verdaderos líquidos, aunque estén subenfriados, sí lo están.

Otra definición, que se refiere más a las propiedades de los vidrios, que podría darse de vidrio sería: «El vidrio es un producto inorgánico, amorfo, constituido principalmente por sílice (SiO_2), duro, frágil, moderadamente transparente, de elevada resistencia a las agresiones químicas y deformable a alta temperatura». Existe cierta controversia en los foros científicos para aceptar una definición que satisfaga a todos. La siguiente definición es más amplia: «Sustancia compacta, físicamente uniforme, que se encuentra en un estado amorfo que a temperaturas bajas se torna rígida y frágil y a temperaturas altas reblandece».

En su gran mayoría las sustancias en general, y los residuos en particular, tienen una estructura cristalina. En ésta las celdillas elementales se disponen con una ordenación geométrica en el espacio formando una red perfectamente definida. En el proceso de fusión, primera etapa para la obtención de un vidrio, a medida que la temperatura va en aumento, el calor distorsiona la red hasta transformarla en una estructura reticulada al azar (estructura amorfa). A mayor temperatura algunos enlaces se rompen y aparece la posibilidad de inserción de metales pesados en la estructura del vidrio.

En resumen, el vidrio puede definirse como un producto inorgánico fundido que se ha enfriado hasta un estado rígido. La posibilidad de incorporar residuos inorgánicos altamente tóxicos a la red atómica convierte a esta tecnología en la más segura para el tratamiento de ciertos residuos.

1.2. LA FORMACIÓN DEL VIDRIO

Una vez elegidas las materias primas éstas se introducen en un horno y se eleva gradualmente la temperatura (en los hornos continuos, la masa a fundir entra a temperatura ambiente y se precipita contra un lecho que se halla a alta temperatura). En cualquier caso el concepto es que las partículas sólidas adquieren un estado de agitación gracias a la energía térmica comunicada y se inician una serie de reacciones en estado sólido. En las reacciones sólido/sólido la superficie específica juega un importante papel en la cinética de reacción, en el sentido de que: a mayor superficie específica (m^2/g) mayor área de contacto y mayor reactividad.

En el campo de los residuos se juega con una cierta ventaja puesto que muchos de los residuos adecuados para la vitrificación lodos, o polvo, el estado de subdivisión es muy elevado. Esto significa

que podrá prescindirse de la siempre costosa operación de trituración.

A medida que el calor va distorsionando, o debilitando, los enlaces químicos de los denominados fundentes, su estructura cristalina se desmorona y funde. El líquido resultante más agresivo que el sólido del cual procede y la cinética de reacción se acelera por dos motivos: las reacciones líquido/sólido son más rápidas, y el nivel de temperatura es mayor (la velocidad de reacción es una función directa de la temperatura).

De hecho las reacciones son muy complejas. Normalmente al inicio de la fusión las reacciones son sólido/sólido, muy lentas por ser los silicatos materiales muy estables, pero pronto existen reacciones líquido/sólido y más adelante, a medida que la viscosidad de los líquidos es menor, se producen reacciones líquido/líquido.

El término materia prima se aplica a aquel mineral, o producto que se le supone una elevada pureza. Pero en mayor o menor cantidad lleva incorporados una serie de impurezas, contaminantes o no, que suelen acelerar las reacciones. Otro factor que acelera la fusión es el estado de cristalinidad de un compuesto. Hay materiales donde la estructura cristalina se halla muy bien definida (como el cuarzo, materia prima básica para la elaboración de los vidrios) y en otras, como es el caso de la mayoría de los minerales de arcilla en que la red cristalina se halla algo distorsionada con fallos e imperfecciones. Esto supone que los enlaces no sean tan fuertes y funda a menor temperatura. La Figura 7.1 simboliza el esquema de una estructura cristalina y otra amorfa.

1.2.1. Fusibilidad de los materiales

La fusión es un proceso térmico donde un sólido se convierte en fase líquida. El punto de fusión es aquella temperatura a la cual las dos fases están en equilibrio. Además de la alta temperatura, las condiciones que conlleva una fusión son: descomposición/combinación química, difusión y disolución. La fusibilidad es un concepto que tiene que ver con la facilidad de que se obtenga un vidrio líquido a la temperatura deseada. En la naturaleza es difícil encontrar una combinación que funda correctamente por debajo de 1.000 ℃. Esta consideración tiene su importancia. Desde el punto de vista energético es obvio que las composiciones más económicas serán aquellas que fundan a menor temperatura también, desde la óptica ambiental es importante formular composiciones que fundan a la menor temperatura posible puesto que serán capaces de captar todos los óxidos contaminantes y se minimizará, o evitará, la posibilidad de volatilizar y emitir compuestos nocivos a la atmósfera.

El estudio de la regla de las fases indica que la adición de una sustancia a otra rebaja siempre el punto de fusión, alcanzándose un mínimo en la mayoría de los sistemas. Cuando más diferentes son las sustancias en liza, tanto mayor es la disminución de la temperatura de fusión. En el mundo de los residuos estas características se alcanzan con facilidad: la variedad de composiciones es infinita y la posibilidad de adición también.

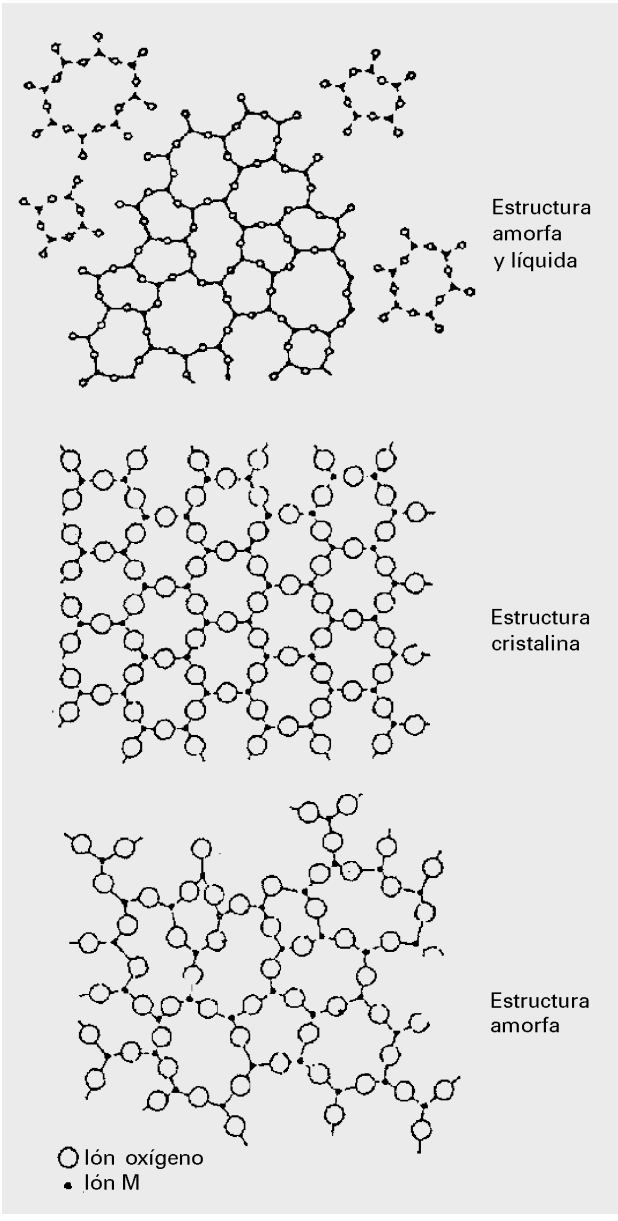


Figura 7.1. Estructura cristalina y amorfa.

Los factores que más afectan a la fusibilidad del vidrio son:

- La sustitución de una red tetraédrica (como la de la sílice) por otra triangular (como la del óxido bórico). Si bien el SiO_2 es el formador de vidrio por excelencia, su masiva presencia obliga a elevar la temperatura de fusión.
- Variación de la relación O/Si. Con independencia de otras consideraciones, el aumento de la proporción de oxígeno distiende el retículo de sílice y rebaja el punto de fusión. El medio más usual de realizar esto es mediante la introducción de P_2O_5 (abundante en los RSU) y óxidos alcalinos, alcalinotérreos y metálicos.
- La sustitución de SiO_2 por co-formadores de retículo, como el TiO_2 o Al_2O_3. Estos óxidos son incapaces de formar vidrio por sí solos, pero mantienen el retículo unido con menor fuerza y por tanto rebajan el punto de fusión.
- Factor tamaño. Cuanto menor es el catión tanto menos viscoso es el vidrio. Así si se sustituye K^+ por Na^+ se rebaja el punto de fusión.
- Factor complejidad. La sustitución de un catión por otros dos rebaja el punto de fusión.

La Figura 7.2 resume, de manera gráfica, la importancia de cada unos de los óxidos por su efecto sobre la fusibilidad. El más efectivo, con diferencia, es el plomo, en sus diversos óxidos: minio o litargirio. Desde el punto de vista ambiental, si no se toman precauciones especiales, ello conlleva claros problemas de emisión (los compuestos de plomo son volátiles a baja temperatura y pueden volatilizar antes de que se forme la fase amorfa, el vidrio).

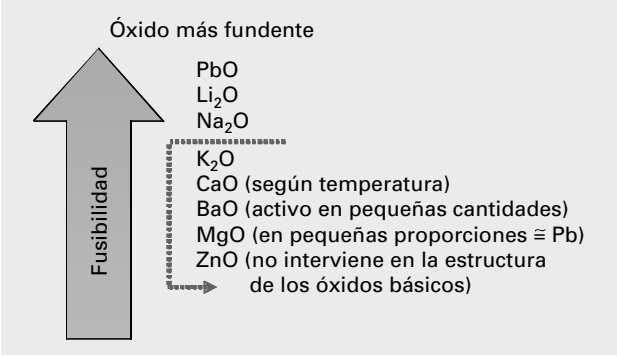


Figura 7.2. La fusibilidad de los diversos óxidos.

Los vidrios con gran cantidad de PbO proporcionan un mayor brillo y en contrapartida una peor resistencia al ataque de los ácidos. Su presencia conduce a una notable disminución de la resistencia a la abrasión. Después del PbO los álcalis proporcionan el flujo más fundente y su orden de reaccionabilidad es Li, Na y K. Los vitrificados con mucha presencia de álcalis son propensos al cuarteo, a no ser que se aumente el SiO_2. Los alcalinotérreos, básicamente el CaO, pueden sustituir paulatinamente a los álcalis a medida que la temperatura de trabajo sea mayor. A menores temperaturas su presencia no puede ser elevada. Posee una mejor resistencia al cuarteo que el PbO y los álcalis.

1.2.2. La viscosidad de los componentes de los vitrificados

El valor de la viscosidad de un líquido fundido a alta temperatura es una propiedad muy difícil de medir. Para ello puede utilizarse el sistema indirecto de medir la caída de la gota de esmalte sobre un plano inclinado. (Sobre un ladrillo refractario cortado en diagonal se sitúa una esfera de polvo de vidrio compactado y el conjunto se introduce en un horno. A medida que va calentándose el polvo irá fundiendo y el líquido resbalando por el plano inclinado. A igualdad de temperatura, el vidrio menos viscoso será aquel que recorra mayor distancia).

La viscosidad de un vidrio da una idea de la capacidad de desarrollo o fluencia del mismo y de la facilidad que encontraran los gases para atravesar la capa de vidrio. Esta propiedad es especialmente importante cuando se trata conseguir un acabado del vidrio de gran calidad ya que existe el peligro de que las burbujas de gases queden atrapadas en el seno del vidrio, si la viscosidad en caliente es alta, confiriere a aquel un aspecto muy deficiente. El intervalo de trabajo de un vidrio se halla por tanto íntimamente relacionado con la viscosidad que el mismo presente a alta temperatura.

En la Figura 7.3 aparecen clasificados, por orden de influencia sobre la viscosidad en caliente, los diversos óxidos que suelen intervenir en la formulación de los vidrios y esmaltes.

La viscosidad de un vidrio depende de la composición química y, naturalmente, de la temperatura. La disminución de la viscosidad es exponencial con la temperatura. El comportamiento de los diversos óxidos que integran el vidrio es diverso. Así los óxidos alcalinos reducen la viscosidad del fundido. En general, cuanto menor es el radio del catión, mayor es la disminución de la viscosidad. La viscosidad disminuye en la siguiente relación:

$$Li_2O > Na_2O > K_2O$$

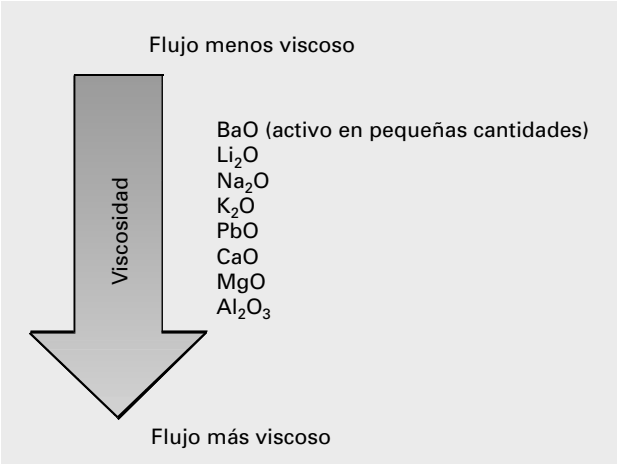


Figura 7.3. Influencia de diversos óxidos en la viscosidad de los vidrios.

1.2.3. La tensión superficial

El desarrollo de los vidrios con la temperatura viene determinado por la tensión superficial. Esto es, si la tensión superficial es alta, el ángulo de contacto entre la «gota» del vidrio y el sólido (ángulo agudo) provoca que durante el enfriamiento la superficie resultante sea rugosa con tendencia a la reabsorción de burbuja (las burbujas suelen proceder de los gases producto de la descomposición de carbonatos).

Por el contrario, si la tensión superficial es baja (ángulo de contacto obtuso entre la «gota» y el sólido) la eliminación de burbuja se ve favorecida y la textura del vitrificado es lisa. La incidencia que sobre la tensión superficial ejercen los diversos óxidos se ve esquematizada en la siguiente escala:

(Reduce φ) $K_2O < B_2O_3 < PbO < Na_2O < SiO_2 <$
$< BaO < ZrO_2 < CaO$ (Aumenta φ)

Es decir, el óxido de potasio es el componente que más reduce la tensión superficial.

1.2.4. El coeficiente de dilatación

Para asegurar un buen comportamiento del vidrio a medida que va enfriándose a la salida del horno, el coeficiente de dilatación (α) debe ser tan pequeño como sea posible. Como sea que conseguir esto es bastante difícil, en el caso que el vidrio deba ser aplicado sobre otro soporte, como será el caso de la cerámica, siempre es mejor que el esmalte quede sometido a compresión (o sea que su coeficiente de dilatación (α) sea inferior al del soporte cerámico). En caso contrario el esmalte se hallará sometido a tracción y sobrevendrá el cuarteo. No obstante, si la compresión del esmalte (vidrio parcialmente recristalizado) es excesiva tendrá lugar el descascarillado o escamado.

La incidencia que sobre el coeficiente de dilatación ejercen los diversos óxidos se ve esquematizada en la siguiente escala:

(Reduce α) $MgO < B_2O_3 < SiO_2 < ZnO < PbO <$
$BaO < Al_2O_3 < CaO < K_2O < Na_2O$ (Aumenta α)

Los materiales cerámicos en general y los vidrios en particular no soportan los esfuerzos de tracción.

1.3. CONSTITUCIÓN DE LOS VITRIFICADOS

Físicamente la estructura vítrea está compuesta, habitualmente, por una fase mayoritaria amorfa, formada por elementos estructurales que no se repiten a distancias regulares, y una, o varias, recristalizadas o desvitrificadas, como consecuencia de una cantidad de vidrio que ha recristalizado o desvitrificado, como consecuencia de la velocidad de enfriamiento. La unidad básica consiste en una combinación tetraédrica (tetraedro Si-O) o triangular (B-O) de un elemento formador de vidrio con el oxígeno.

Desde el punto de vista químico los constituyentes vidriados se pueden considerar como combinaciones de diferentes óxidos, entre los que cabe distinguir:

Óxidos formadores de vidrio, o de retículo, que forman la unidad básica compuesta de unidades estructurales que se repiten a distancias regulares. Los óxidos principales son del tipo RO_2 (Si, Zr, Sn, V, B, P,...).

El cuarzo (SiO_2) suele estar perfectamente cristalizado y, con frecuencia exento de impurezas. Es muy inerte y quizás por ello sea uno de los elementos más abundantes de la corteza terrestre. No obstante es capaz de formar vidrio por sí solo. Para ello es preciso elevar la temperatura por encima de 1.700ºC y dejar enfriar el fundido. Con ello se obtiene el denominado vidrio de sílice que tiene un coeficiente de dilatación bajísimo y una alta resistencia al choque térmico. La obtención de estas temperaturas es, industrialmente, antieconómica y para rebajar el punto de fusión se añaden los modificadores de la red de vidrio que, por esta razón se les llama también fundentes.

Además de los óxidos del tipo RO_2, existen otras combinaciones que son también susceptibles de formar estructuras vítreas como R_2O_3, RO_3 y R_2O_5. En resumen, los formadores de vidrio deben cumplir una serie de condicionantes geométricos para la consolidación de estructuras de vidrio:

- El índice de coordinación del catión debe ser pequeño.
- Un ión oxígeno no debe estar unido a más de dos cationes.
- Los poliedros constituidos por los oxígenos sólo pueden tener en común vértices, nunca aristas.
- Tres vértices, al menos, de cada poliedro deben pertenecer al mismo tiempo a otros poliedros.

Óxidos modificadores del retículo, que ocupan los intersticios de la red principal, por eso también reciben el nombre de modificadores del retículo ya que debilitan los enlaces (disminuyendo por tanto la energía necesaria para romperlos). Afectan a la fusibilidad y estabilidad de la red vítrea. Los óxidos son del tipo RO y RO_2 (Na, K, Ca, Mg, Pb, Zn, Cu, Co, Ni,...).

Óxidos estabilizadores de red. Las celdillas elementales amorfas distribuidas al azar, tienen tendencia a desmoronarse y caer a un estado energético de menor energía como es el cristalino, fenómeno que se conoce como desvitrificación. Los estabilizadores de red, también llamados co-formadores de retículo, actúan dando estabilidad a la estructura amorfa y pertenecen al grupo R_2O_3 (Al, Fe, Cr y a veces B,...).

En el siglo pasado el ceramista Seger ordenó los diversos óxidos y estableció una sistemática de formulación de manera que la suma de los mols de los óxidos fundentes fuese la unidad y ordenación de los óxidos que, en líneas generales, los denominó:

- Flujo básico o fundente: $RO + R_2O$
- Anfóteros: R_2O_3
- Formadores de vidrio: $RO_2 + R_2O_5 + RO_3$

La Tabla 1.1 expone unos ejemplos de vitrificados según sea la estructura de la fórmula Seger. Las combinaciones son infinitas y el Pb, obviamente, puede sustituirse por otros fundentes.

En el orden práctico esta clasificación obedece al siguiente esquema:

- Flujo básico formado por un conjunto de óxidos de metales alcalinos y alcalinotérreos que son los que aportan la fusibilidad al sistema. El más activo de todos ellos es el óxido de plomo, que funde a una temperatura relativamente baja y ataca al resto de los óxidos.
- Grupo de los formadores de vidrio por excelencia es el cuarzo (SiO_2). El cuarzo es uno de los compuestos más estables que existen, no en vano es uno de los más abundantes de la corteza terrestre. Para formar el vidrio es preciso alcanzar una temperatura muy alta para lograr su fusión. En la medida de que el flujo básico, o fundente sea más activo la fusión del conjunto se producirá a menor temperatura con el consiguiente ahorro energético.
- Grupo de los anfóteros. Los vidrios formados, en exclusiva, por los dos componentes antes citados no suelen ser estables. Los óxidos anfóteros (a veces actúan como fundentes y otras como formadores de vidrio) ayudan a la estabilización del conjunto impidiendo la desvitrificación.

Tabla 7.1. Estructura molar de un vitrificado según la fórmula Seger

Flujo básico	$RO + R_2O$	R_2O_3	$RO_2 + R_2O_5 + RO_3$
Plúmbico	PbO :1,0	Al_2O_3 :0,9	SiO_2 :2,5
Plúmbico-alcalino	$Na_2O + K_2O$:0,2 CaO :0,15 PbO :0,65	Al_2O_3 : 0,25	SiO_2 : 1,5
Alcalino-plúmbico	$Na_2O + K_2O$:0,4 CaO :0,2 PbO :0,4	Al_2O_3 : 0,3	SiO_2 : 1,6
Alcalino-alcalinotérreo	$Na_2O + K_2O$:0,3 CaO :0,2 ZnO :0,15 BaO :0,1 PbO :0,25	Al_2O_3 : 0,35	SiO_2 : 1,75

Tabla 7.2. Composición de diversos vidrios

Vidrio	SiO_2	B_2O_3	Al_2O_3	Na_2O	K_2O	CaO	BaO	MgO	PbO	Fe_2O_3
Ventana	72,5		1,5	13	0,3	9,3		3,0		0,1
Botella	73		1	15		10,0			0,05	
«Pírex»	80,6	12,6	2,2	4,2		0,1		0,05		0,05
Fibra vidrio	54,6	8,0	14,8	0,3	0,3	17,4		4,5		
«Cristalería»	55,5				11,0				33,0	
Prot. radiación	29						9,0		62,0	

En el presente texto se hablará tan sólo de los denominados vidrios de óxidos, es decir aquellos que se formulan a través de sus óxidos, puesto que son los más comunes y los que tienen mayores aplicaciones al tratamiento de residuos.

Las composiciones como las que muestra la Tabla 7.2 vitrifican de forma relativamente sencilla en toda una gama de temperaturas asequibles, dando lugar a diversos tipos de vidrios bien conocidos.

1.3.1. Formula molar y porcentual

Para clarificar la terminología usada en esta parte, la Tabla 7.3 propone un ejemplo de una composición de carga, también llamada de molino, es decir las cantidades en porcentajes de materias primas, con los correspondientes análisis, que se introducen en el horno de fusión.

Sin embargo, la fórmula de carga no proporciona información sobre los parámetros que se han descrito, como fusibilidad, tensión superficial, dilatación, etc. Para ello hay que recurrir a la fórmula molar o la fórmula Seger, ambas expuestas en la Tabla 7.4, y calculadas a partir de la composición de carga indicada en la tabla anterior.

En la tabla, dividiendo todos los valores molares por la suma de los óxidos básicos se consigue que la suma de los óxidos básicos sea la unidad, tal como exige la fórmula Seger.

A partir de la fórmula Seger es relativamente fácil corregir el comportamiento de un vitrificado, como podría acontecer con el exceso de fusibilidad, la falta de brillo o la tendencia a la desvitrificación.

1.3.2. La desvitrificación

Como indica el propio título, la desvitrificación es un fenómeno que consiste en la paulatina recristalización del vidrio, perdiendo su estructura amorfa. Se trata de un fenómeno complejo en el que intervienen muchas variables. El estado vítreo es más inestable que el cristalino, ya que a esta estructura corresponde una energía mínima. Por tanto, la tendencia natural de los vidrios conducirá a la desvitrificación.

La recristalización de un vidrio conlleva un aumento de la densidad lo que suele traer consecuencias nefastas desde un punto de vista de estabilidad mecánica. Cuando un vidrio recristaliza no lo hace de forma homogénea sino que el proceso se inicia en determinadas zonas y fases. Los cambios dimensionales provocaran tensiones que se traducirán en fisuras. No obstante, lo que puede ser catastrófico en un vidrio ventana es favorable y buscado en otras formaciones vítreas. Así en los esmaltes cerámicos o en los vitrocerámicos, la desvitrificación es una cualidad buscada, ya que, por ejemplo, mejora la resistencia mecánica o el comportamiento al choque térmico.

Tabla 7.3. Composición de carga de un vidrio

	%	Na_2O	K_2O	Al_2O_3	SiO_2	CaO	PbO	
Feldespato	45,0%	4,5%	7,2%	17,5%	70,5%			99,7%
Caolín	13,0%			38,5%	60,0%			98,5%
Cuarzo	30,0%			1,5%	98,0%			99,5%
Carbonato de calcio	7,0%				0,5%	97,0%		97,5%
Minio	5,0%				1,5%		98,0%	99,5%
TOTAL	100,0%	2.0%	3,2%	13,3%	69,0%	6,8%	4,9%	99,3%

Tabla 7.4. Fórmula molar y Seger de un vidrio

Óxido	PM	mols				
Na_2O	61,8	0,032767				
K_2O	94,2		0,034395			
CaO	56,08				0,121077	
PbO	223,21					0,021952
Al_2O_3	101,94			0,130763		
SiO_2	60,06				1.149434	

Na_2O	0,032767	0,155891		**mols**	**%**
K_2O	0,034395	0,163636	Óxidos básicos	1	14,1
CaO	0,121077	0,576032			
PbO	0,021952	0,104440	Al_2O_3	0,622115	8,8
Suma parcial	0,210191	1			
Al_2O_3	0,130763	0,622115	SiO_2	5,468512	77,1
SiO_2	1.149434	5,468512		7,098627	

En la práctica de la inertización de residuos, el hecho de que se produzcan desvitrificaciones lejos de ser un inconveniente representa una ventaja puesto que los microcristales creados en el seno del vitrificado, tienen una solidez mayor que el vidrio del que proceden, lo que en términos ambientales se traduce por un menor peligro de lixiviación.

Aunque no pueda establecerse una garantía de estabilidad guiándose únicamente por el criterio de la desvitrificación, en principio pueden aceptarse como válidas las siguientes premisas:

- En igualdad de condiciones la estructura cristalina es más resistente que la vítrea. Por tanto el fomento de la desvitrificación es aconsejable siempre y cuando el vidrio residual no resulte muy débil.
- El factor complejidad de cationes, que forman parte del grupo de los óxidos modificadores de retículo, favorece la fusión más prematura a la par que forma un vidrio más complejo y resistente. Esta propiedad es claramente favorable a la aplicación de la vitrificación para la inertización de residuos.
- Los vidrios generados a mayor temperatura son más resistentes que los de baja temperatura.

1.4. PROPIEDADES DE LOS VITRIFICADOS DURANTE LA FUSIÓN

Durante la fusión los vidrios se comportan como un líquido viscoso. Se entiende por fusión aquel estado que consigue una viscosidad tal que permite una perfecta homogeneización de las diversas fases que coexisten. Hasta llegar a la fusión se llevan a cabo reacciones en estado sólido/sólido, fusiones de ciertos compuestos, reacciones líquido/sólido y, finalmente, reacciones líquido/líquido. La temperatura a la que se logra el flujo a la viscosidad requerida se llama temperatura de maduración.

Hay que hacer notar que, a diferencia de los sólidos cristalinos, los amorfos no tienen temperatura de fusión, de ahí que se use el término maduración. Por ejemplo, una determinada composición de vidrio común funde alrededor de 1.200 ℃ pero, para poder extraerlo (colarlo) del horno se debe alcanzar una temperatura muy superior, 1.450 ℃, hasta que la viscosidad sea tan baja que permita el colado. Sin embargo, el mismo vidrio para ser conformado es suficiente calentarlo sin llegar a los 1.000 ℃ y, con probabilidad a los 600 ℃ ya se deformará.

De las diversas propiedades que tienen los vitrificados durante la fusión la más destacable, en el ámbito de la vitrificación de residuos, es la viscosidad.

Viscosidad: es una importante propiedad que controla el éxito de los diferentes procesos industriales. Su valor, íntimamente ligado a la fusibilidad, determina la gama de temperaturas en la que el vidrio puede fluir libremente. También gobierna la facilidad con que los gases pueden escapar o quedar encerrados en el interior (muchas materias primas como los carbonatos se descomponen y emiten gases que no deberían quedar atrapados en el vidrio).

La viscosidad (ν, en din · seg/cm^2 = poise) de cualquier fluido, se define como la fuerza (F, en din) necesaria para desplazar dos superficies (A, en cm^2)

paralelas separadas entre sí una distancia (*d*, en cm) a una velocidad determinada (*v*, en cm/seg, velocidad relativa entre ambas superficies), según la expresión:

$$F = n \cdot A \frac{\Delta v}{\Delta d}$$

La unidad de viscosidad denominada «centipoise» (0,01 poise) equivale prácticamente a la del agua a 20 ℃ y a la presión de una atmósfera. La magnitud resultante de dividir la viscosidad absoluta por la densidad absoluta o masa específica es el «stoke» (1 stoke = 1 cm^2/seg) y es la que comúnmente se utiliza en los cálculos de la mecánica de fluidos. Al no intervenir términos de masa, a esta magnitud se la denomina coeficiente de viscosidad cinemática o, simplemente, viscosidad cinemática.

La viscosidad de un vidrio depende de la composición química y, naturalmente, de la temperatura. La disminución de la viscosidad es exponencial con la temperatura. El comportamiento de los diversos óxidos que integran el vidrio es diverso. Así los óxidos alcalinos reducen la viscosidad del fundido. En general, cuanto menor es el radio del catión mayor es la disminución de la viscosidad.

Los óxidos fundentes por excelencia como el PbO y en menor intensidad el CdO, BaO y ZnO reducen la viscosidad, en cambio los alcalinotérreos se comportan de forma irregular. El CaO aumenta la viscosidad a temperaturas inferiores a 1.000 ℃, mientras que a temperaturas superiores la disminuye. Por el contrario, el MgO, óxido bastante refractario, siempre aumenta la viscosidad del fundido.

Los óxidos SiO_2, Al_2O_3 y ZrO_2 siempre aumentan la viscosidad. El óxido de boro presenta la denominada «anomalía del boro». A altas temperaturas reduce la viscosidad de manera importante, pero a menores temperaturas la aumenta si el contenido de B_2O_3 es inferior al 15%, mientras que en cantidades mayores la disminuye.

Tensión superficial: El flujo de los vidrios se ve muy influenciado por la tensión superficial y el ángulo de contacto. Una tensión superficial baja favorece la eliminación de burbujas gaseosas, en cambio una tensión superficial alta puede llegar a readsorber burbujas durante el enfriamiento del vidrio.

La tensión superficial (φ Nw/m) puede definirse como la fuerza de cohesión de las moléculas superficiales de un fluido dirigida hacia el interior del mismo. La tensión superficial de un líquido se opone al aumento de la superficie de éste, es decir, el líquido tiende a tomar la forma que suponga la mínima superficie. Así pues, es más común definir la tensión superficial (φ, en Nw/m) como el trabajo (τ, en kg · m) necesario para incrementar la superficie (*A*, en m^2) de un líquido en la unidad de superficie, según la expresión:

$$\varphi = \frac{\Delta \cdot \tau}{\Delta \cdot A}$$

La tensión superficial baja facilita el llenado de los poros originados por la desgasificación. Como sea que este parámetro está relacionado con la fusibilidad y la viscosidad, una tensión superficial baja significa una mayor reactividad. Los óxidos que disminuyen de forma más expeditiva la tensión superficial son: PbO, V_2O_5, CrO_3, As_2O_3.

El aumento de la temperatura hace disminuir la tensión superficial a razón de 4 din/cm cada 100 ℃.

Pérdida de constituyentes por volatilización: Esta es una de las propiedades fundamentales que deben tener los vitrificados ya que afecta directamente a la emisión de metales y, por tanto, al medio ambiente.

La tendencia a la volatilización está relacionada con la tensión de vapor de los óxidos en estado puro: la pérdida por volatilización es proporcional a la presión de vapor del material que se volatiliza. Sin embargo, la realidad demuestra que no existe una correlación directa entre ellas. La naturaleza y cantidad de los componentes del vidriado ejercen una fuerte influencia en la volatilización. Los óxidos más propensos a volatilizar son PbO, los alcalinos y el boro.

La clave del éxito para evitar la volatilización es conseguir una formulación de vidrio que consiga una fase líquida a la menor temperatura posible. El propio óxido de plomo es un ejemplo. Los primitivos vidriados de plomo (pátina transparente vitrificada que cubre la tierra cocida para utensilios de cocina: platos, vasijas, etc.) se formulaban en base a galena (sulfuro de plomo) y cuarzo. A relativa baja temperatura el sulfuro se descompone y el metal, en parte funde y otra parte se oxida rápidamente iniciándose la fusión. El líquido formado ataca al cuarzo. Al final se obtiene un vidrio cuya fórmula es: $SiO_2 \cdot PbO$. Parte del Pb, en forma de metal, se habrá volatilizado e incluso parte del óxido de plomo también. Cuando en la formulación se sustituye la galena por óxido de plomo, la pérdida es mucho menor. Si a la formulación se le adiciona alúmina, estabilizador del retículo, la pérdida se reduce todavía más y si el plomo se

añade por medio de una frita (vidrio prefundido) la volatilización es nula.

Una vez formado el fundido, la bibliografía confirma que cuando el contenido de plomo es alto la volatilidad se reduce en la medida que se incrementa la cantidad de sílice. Así, en el $2PbO \cdot 3SiO_2$, la volatilidad del Pb a 1.000 ºC es nula, mientras que la pérdida de Pb a 930ºC en el vidrio $PbO \cdot SiO_2$ es muy reducida. En cambio la pérdida de Pb en el vidrio $2PbO \cdot SiO_2$ se aproxima al 3%.

Otro factor a tener en cuenta es la posición relativa del fundido con respecto la fuente suministradora de energía. Siguiendo con el ejemplo del Pb, ya que es uno de los metales pesados más volátiles, si la fusión se lleva a cabo en un entorno abierto, la posibilidad de volatilización es mucho mayor que si se realiza en un entorno muflado. De ahí que en los ensayos llevados a cabo sobre el Ecobrick® los balances de masa revelaron que las pérdidas de plomo fueron casi nulas (el metal estaba inmerso en el interior de la masa de arcilla sin posibilidad de movilidad hacia el exterior). En cambio el plomo contenido en el mismo fango usado para fabricar el Ecobrick® era fácilmente evaporado cuando se calcinaba el fango sólo.

Como norma general la tendencia a la volatilización de cualquier metal crece con el tiempo de exposición a alta temperatura.

Separación de fases: A la temperatura de maduración es de esperar que exista una sola fase homogénea. No obstante puede acontecer que se segregue una, o más, fases amorfas. La causa radica en la inmiscibilidad de líquidos de diferente composición que se pueden generar durante la fusión de un vidrio.

Cuando la tensión superficial de alguna de las fases líquidas que coexisten en el vidrio es muy diferente de la matriz principal, se formará una separación que se concretará en la formación de unas gotas (si la tensión superficial de fase dispersa es mayor).

Desvitrificación: Consiste en la formación de estructuras cristalinas (recristalización) en el seno de la estructura amorfa del fundido. El fenómeno tiene lugar en dos etapas. En la primera se desencadenan unos núcleos o centros de cristalización y en la segunda etapa tiene lugar el crecimiento de los cristales.

En general, cuanto más simple es la fórmula de un vidrio, tanto más tiende a desvitrificarse a medida que la proporción de oxígeno es más elevada. Así un vidrio común de sosa-cal-sílice, con más de un 20% de CaO puede desvitrificarse, si bien puede evitarse por sustitución de un 3% de CaO por MgO o Al_2O_3.

La composición química es el factor que más influye en la desvitrificación. La alúmina actúa como estabilizadora de la red y evita la desvitrificación. La reducida cantidad de alúmina y alta presencia de zinc favorece la formación de largos y vistosos cristales de quilemita (Zn_2SiO_4). Otras fases cristalinas que aparecen con frecuencia son zircón ($ZrSiO_4$), rutilo (TiO_2), celsiana ($BaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$), etc.

La capacidad de recristalización también depende de la velocidad de enfriamiento. La velocidad baja de enfriamiento favorece la desvitrificación. También la viscosidad y tensión superficial baja favorecen la capacidad de recristalización. De hecho la viscosidad es probablemente el factor más determinante. Cuando la temperatura decrece, la viscosidad aumenta y la solubilidad del futuro cristal en el seno del líquido decrece y ello favorece la separación de fases con la creación de un núcleo de cristalización. A medida que la temperatura va descendiendo los cristales van aumentando y, se comprende que, cuando más lento sea el enfriamiento más posibilidades de crecimiento tendrán los neocristales.

1.4.1. Color y reciclado

En muchas ciudades la recogida del vidrio se lleva a cabo en un solo contenedor donde, obviamente, se mezclan los diversos tipos de vidrios. Si por las razones que sean, el gestor encargado de la recogida no puede separar las clases de vidrios por colores, el vidrio recuperado solo se puede emplear para fabricar un tipo de color o bien destinarlo a otras aplicaciones más sencillas y menos rentables.

Sabido es que es normal usar tres tipos de vidrio: el transparente (comúnmente denominado blanco), el verde y el ámbar (o marrón). Parta reciclar correctamente se deben separar los colores, por ello, allá donde sea posible se instalan tres contenedores en lugar de uno. Por lo general, en el caso de la recuperación de envases para la fabricación de vidrio transparente (denominado vulgarmente blanco) se exige una tasa de calidad de color del 99%, mientras que si se trata de vidrio ámbar o verde es suficiente una calidad de triaje del 90%.

Cada reciclador, fábrica de vidrio, tiene sus propios estándares de admisión pero se consideran normal no admitir más de 150 g. de piedras y cerámica por tonelada de vidrio. Para el reciclaje los vidrios deben estar exentos de cualquier cantidad de «*pyrex*» o «*visionware*». El plomo de las cápsulas funde y condensa en la bóveda del horno y la porcelana y

otras cerámicas no funden. Si el vidrio recuperado está muy contaminado con impropios a veces se recurre a sistemas de reciclaje como el «*glassfalto*» o la fabricación de mobiliario urbano.

Si se mezclan los vidrios en el horno de fusión los átomos que se encuentran ocupando espacios entre los grupos de silicato son, sobre todo, elementos de transición, es decir dan coloración al vidrio, los más usuales son Fe, Co, Cu, Cr, Mn, Ce y U. El origen del color depende del estado de oxidación y del número de coordinación del ión metálico. En el estado fundido alcanzan el equilibrio rodeándose por un determinado número de oxígenos, pertenecientes al silicato, dependiendo esto si están ocupando posiciones de los formadores de vidrio o modificadores del retículo. Los óxidos comunes colorantes por excelencia son:

- Óxidos de hierro FeO y Fe_2O_3. Puede dar lugar a: rojos, marrones, verdes y azules.
- Óxidos de cromo CrO y Cr_2O_3. Puede dar lugar a: verdes y amarillos.
- Óxido de cobre CuO. Puede dar lugar a: verdes, turquesas y azules.
- Óxido de cobalto CoO. Da lugar a: azules.
- Óxidos de manganeso MnO_2 y Mn_2O_3. Puede dar lugar a: violetas, marrones, y negros.
- Óxidos de níquel NiO. Puede dar lugar a: amarillos, violetas, negros y azules.
- Óxidos de vanadio VO_2, V_2O_3 y V_2O_5. Puede dar lugar a: amarillos, verdes y azules.
- Óxidos de uranio UO_2, UO_3 y U_3O_8. Puede dar lugar a: amarillos y negros.

Obsérvese que el mismo óxido puede dar lugar a más de un color. Ello se debe, entre otras razones, a la atmósfera reinante en el interior del horno.

Si los colores están mezclados y no es factible separarlos una de las aplicaciones en alza, al margen de las detalladas en el capítulo anterior, es su destino como material fundente en las formulaciones de gres porcelánico.

El DVD adjunto, en el punto 1, se aporta información sobre la pureza del vidrio a partir de residuos.

1.5. PROPIEDADES DE LOS VITRIFICADOS A TEMPERATURA AMBIENTE

Un vidriado a temperatura ambiente debe considerarse un material y como tal tiene unas propiedades químicas, mecánicas, térmicas, etc., función de su fórmula química y su sistema de fabricación que se pueden medir perfectamente.

Un vidrio convencional al que se le ha añadido lodo galvánico es mas resistente a la lixiviación que un vidrio sódico/cálcico, ello puede ser debido a que en la nueva estructura (con nuevos óxidos metálicos) hay una mayor cantidad de átomos unidos a un tetraedro de sílice. Al sustituir átomos de alcalinos y alcalinotérreos por metales con valencia mayor que uno, pueden establecer enlaces con más de un tetraedro de sílice, dando lugar a una red más estable. Ello es de vital trascendencia en el tratamiento de residuos ya que reduce el peligro de lixiviación.

1.5.1. Propiedades químicas

Desde el punto de vista de la inertización de residuos, las propiedades químicas son las más importantes ya que de ellas deriva la posibilidad de lixiviación frente a los diversos ataques.

Los agentes atmosféricos en general y el agua en particular, ejercen una hidrólisis sobre los vidrios que puede llegar a disolver o a descomponer parte de ellos. La composición del vidrio juega, una vez más, el papel más destacado. Los óxidos alcalinotérreos, los metales tri y tetravalentes refuerzan la resistencia a la agresión del agua.

En general, la mayoría de los metales pesados corresponden a estas valencias. La adición de B_2O_3 aumenta también la resistencia al agua. Sin embargo debido a la «anomalía del boro» porcentajes superiores al 15% invierte el efecto disminuyendo la resistencia a la acción del agua. Otros factores como el tiempo de exposición y la temperatura influyen en el sentido más lógico: a mayor tiempo de exposición y temperatura mayor ataque del agua.

Resistencia a la acción de los ácidos: A diferencia de lo que sucede con la inertización de metales en matrices de cemento o carbonatadas, los vidrios, en general, son resistentes al ataque de los ácidos.

El medio ácido dispone de iones hidrónio libres. A ser iones ligeros y dotados de gran movilidad son susceptibles de ubicarse en los huecos y microporos e iniciar una reacción del tipo:

$$Si\text{-}O\text{-}Na + H^+ \rightarrow Si\text{-}OH + Na^+$$

Es decir, existe un intercambio iónico y el silicato se hidrata lo que, a la larga, le conduce a la destrucción.

La sustitución de metales alcalinos por divalentes, en particular el Zn, mejora de manera notable la resistencia a los ácidos. El Pb la disminuye. En los casos en que deba sustituirse metales alcalinos sin querer aumentar el punto de fusión se puede añadir boro. El B_2O_3 se comporta de la misma manera que lo hacía frente al agua.

Los óxidos TiO_2 y ZrO_2 aumentan la resistencia a la agresión de los ácidos.

Al igual que acontecía con el agua, la disminución del pH, el tiempo de exposición y la temperatura son factores que favorecen el ataque.

El único ácido que ataca a todos los vidrios y silicatos es el fluorhídrico.

Resistencia a la acción de las bases: El ataque por bases es más complejo. De manera simplificada, las bases liberan iones OH^- que pueden llegar a disolver los vidrios, de acuerdo con la reacción:

$$2 \cdot (\text{Si-O-Si}) + OH^- + Na^+ \rightarrow \text{Si-OH} + \text{Si-O-}Na^+$$

En general los vidrios ricos en SiO_2 son resistentes a la agresión alcalina, sin embargo los vitrificados ricos en sílice presentan un punto de fusión alto. Los álcalis favorecen la absorción de agua, con los consiguientes problemas de una hidrólisis. En general, en el ataque de las bases influyen los mismos factores expuestos al comentar el ataque de los ácidos. La alúmina reduce el ataque de las bases. En cambio el TiO_2 la aumenta.

1.5.2. Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas de un vitrificado son las que mejor determinan la idoneidad para la valorización de residuos. Los siguientes apartados exponen el comportamiento de los vitrificados frente a las diversas solicitaciones mecánicas: resistencia a la abrasión, a la compresión, al impacto, etc.

Elasticidad: Cuando a un cuerpo se le aplica un esfuerzo de tracción (F, en kg) se alarga una cierta longitud (Δl, en m). Si l_0 era la longitud inicial, la deformación relativa, o específica, será $\Delta l/l_0$. Cuando cesa la solicitación el cuerpo vuelve a su longitud inicial, de manera que se dice que el material es elástico. Este comportamiento está gobernado por la ley de Hooke, que establece una proporcionalidad entre el esfuerzo y la deformación:

$$E = \frac{F}{\Delta l / l_0}$$

Tabla 7.5. Módulos de elasticidad y cargas a rotura

Material	E (kg/cm²) $\times 10^6$	σ (kg/cm²)
Alúmina sinterizada (5% porosidad)	155	88.000-145.000
Magnesia sinterizada (5% porosidad)	89	44.000
Carburo de silicio denso (5% porosidad)	199	73.000
Ladrillo de magnesita	73	11.000
Ladrillo gresificado	41	2.200
Porcelana de esteatita	29	58.000
Porcelana de mullita	29	29.000
Vidro «Pyrex»	29	29.000
Vidrio común de sílice	31	29.000
Acero común de construcción (A 36)	2,1	4.000.000(*)

(*) a la tracción.

La constante E recibe el nombre de módulo de elasticidad o de Young. El módulo de elasticidad será tanto más elevado cuanto menor sea el alargamiento producido al someter el material a una determinada tensión, es decir, cuanto más elástico sea un material menor será su módulo de elasticidad. En líneas generales los vidrios tienen un módulo de elasticidad intermedio, como indica la Tabla 7.5, entre las cerámicas avanzadas, las cerámicas convencionales y los aceros.

En los vidrios, los óxidos alcalinos reducen el módulo de elasticidad. También lo reduce, y de manera exponencial, la presencia de burbujas de gases atrapadas en el vidrio. Según muestra la tabla, a medida que el enfriamiento del vidrio es más lento, el módulo de elasticidad aumenta puesto que se generan recristalizaciones.

Resistencia mecánica: La carga de resistencia se define como la fuerza por unidad de superficie que puede soportar un material hasta la rotura. La mayoría de los materiales presentan una resistencia a la compresión muy superior que a la tracción. Los vidrios no son una excepción sino más bien al contrario. Los materiales cerámicos, y los vidrios en particular, soportan bien los esfuerzos de compresión pero no los de tracción.

En general la resistencia mecánica es tanto mayor cuanto más importante es la fracción de vidrio recristalizado.

La resistencia a la abrasión es un caso particular de la resistencia mecánica. Se define como el cambio de textura del vidrio ocasionado por un tipo de solicitación mecánica que produce arrastre de partículas. Básicamente depende de la composición del vidria-

do. Esta resistencia también es mayor cuanto más importante es la fracción de vidrio recristalizado.

1.5.3. Otras propiedades

Se puede combinar el excelente comportamiento bioactivo de los vidrios con la textura abierta y porosidad ordenada de los materiales porosos. Ello tiene aplicaciones en medicina. Los denominados «vidrios con plantilla» parten de la posibilidad de sintetizar vidrios usando surfactantes directores de la estructura, tal y como se procede en las síntesis de materiales mesoporosos de sílice.

De esta forma se consiguen materiales con bioactividad equivalente o superior a los de los vidrios con una porosidad ordenada que los hace óptimos para introducir fármacos, péptidos, proteínas o factores de crecimiento para su posterior liberación controlada.

2. Inertización de residuos por medio de vitrificación

Es importante diferenciar entre la vitrificación y la encapsulación. La vitrificación es un proceso por el cual se funde un conjunto de materiales inorgánicos presentes y posteriormente se enfrían con lo que se consigue una naturaleza fisicoquímica unitaria muy homogénea en el producto de salida. Para lograr la fusión es preciso alcanzar una temperatura muy elevada, de ahí las connotaciones de carácter energético. Por otro lado la vitrificación está considerada como la tecnología más segura para lograr la inertización de residuos, de naturaleza inorgánica, de ahí el interés en el tratamiento de residuos.

En los cristales las celdillas elementales se disponen con una ordenación geométrica en el espacio formando una red perfectamente definida. En el proceso de fusión, primera etapa para la obtención de un vidrio, a medida que la temperatura va en aumento, el calor distorsiona la red molecular hasta transformarla en una estructura reticulada al azar (estructura amorfa). A mayor temperatura algunos enlaces se rompen y aparece la posibilidad de inserción de metales (óxidos) pesados en la estructura del vidrio.

La Figura 7.4 esquematiza la diferencia que existe entre una encapsulación, tratamiento fisicoquímico de un contaminante, y una vitrificación o inserción química del contaminante en la red vítrea.

La posibilidad de incorporar residuos inorgánicos altamente tóxicos a la red amorfa de un vidrio convierte a esta tecnología en la mas segura para el tratamiento de ciertos residuos puesto que los productos tóxicos no podrán escaparse, lixiviar, de su confinamiento. A su vez esto sugiere otra alternativa: transformar un residuo peligroso en un material inerte y, por tanto valorizable.

Desde la óptica ambiental la vitrificación debería considerarse el homónimo de la incineración para el tratamiento de residuos inorgánicos tóxicos y peligrosos, con la desventaja, desde el punto de vista energético de que la incineración suele ser un proceso energéticamente excedentario, mientras que la vitrificación es demandante. No obstante, ello no significa que el coste energético deba ser muy elevado. Este dependerá, básicamente, de la temperatura de fusión.

Una vez el residuo ha sido confinado en el seno del vidriado, aquél pasa a formar parte de la naturaleza vítrea y debe considerarse como un todo. Así, en rigor debe hablarse de silicatos y considerar su comportamiento ante los ataques químicos procedentes de: agua, ácidos y bases.

Resistencia a la acción del agua: El agua da lugar a la hidrólisis de silicatos al actuar sobre la red vítrea pasando a la disolución los hidratos solubles. La resistencia a la acción del agua depende de la composición del vidriado (en general los óxidos alcalinotérreos y la adición de óxidos tri y tetravalentes produce un efecto favorable), de resistencia al tiempo del ataque (obviamente cuanto mayor sea la exposición más probabilidad de ataque) y de la temperatura (a mayor temperatura del agua, mayor velocidad de reacción y mayor ataque al vidriado).

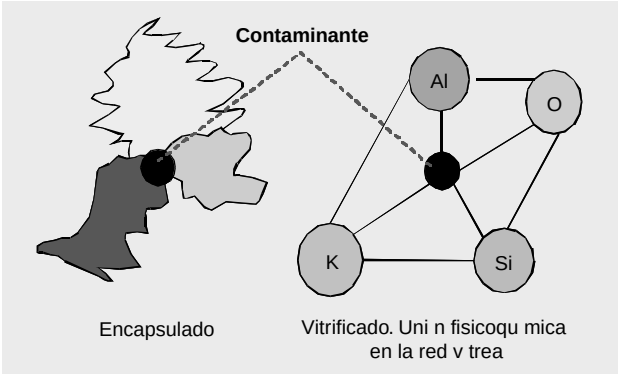


Figura 7.4. Diferencia entre la encapsulación y la vitrificación.

Resistencia a la acción de los ácidos: Los ácidos tienen iones H^+ abundantes y disponibles, susceptibles de ser intercambiados con iones alcalinos presentes en la red vítrea, convirtiéndolo gradualmente en sílice hidratada. Los factores que influyen en el ataque son: la composición del vidriado (los óxidos alcalinos y el PbO favorecen el ataque, mientras que el ZnO lo retarda. Los trivalentes, en cantidades moderadas y el TiO_2 y el ZrO_2, también mejoran la resistencia). El valor del pH (cuando menor sea el pH, mayor será el ataque), el tiempo de exposición y la temperatura, actúan de la misma manera que el agua.

Resistencia a la acción de las bases: El ataque se produce sobre el retículo formando compuestos solubles. El ataque será mayor cuanto mayor sea el valor del pH. La adición de alúmina suele ser beneficiosa para mejorar la resistencia. En general influyen los mismos factores, y en el mismo sentido, que en el ataque de los ácidos.

La Figura 7.5 muestra las posibilidades de usar residuos en lugar de materias vírgenes para la formulación de vitrificados. La longitud de las bandas indica cantidades usuales en las formulaciones de los vidrios.

Uno de los residuos más recurrentes de aplicación para la vitrificación es la arena de fundición que constituye el residuo por excedencia de las fundiciones. Desde el punto de vista de la vitrificación lo más sobresaliente es que están constituidas, fundamentalmente, por cuarzo aglomeradas por arcillas bentoníticas.

En principio son susceptibles de ser vitrificados todos los óxidos metálicos, si bien la proporción de cada óxido es necesariamente diferente. Un vidrio común está formado, en cifras redondas, por 75% SiO_2 (el formador de la matriz vítrea por excelencia, pero también puede intervenir el B, V y P, este último muy abundante en los RAEE (Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos), un 23% de CaO y Na_2O (los fundentes) y el resto de Al_2O_3 (estabilizador de la red vítrea). A partir de esta composición elemental se pueden añadir otros fundentes (Pb, Zn, Mg, K, Ba, Cd, Sr, etc.) y anfóteros, cromóforos o estabilizadores (Al, Fe, Cr, Co, Cu, As, Sb, etc.).

2.1. FORMULACIÓN DE UN VITRIFICADO

De entre los diferentes criterios, o modelos, que existen sobre la formación de vidrio el propuesto por Plumat relaciona el radio del anión al del catión (Ra/Rc), por una parte, y la relación entre la valencia del catión y el anión (Vc/Va) por otra, tal como reproduce la Figura 7.6.

Es decir, casi todos los elementos de la tabla periódica son susceptibles de ser vitrificados si la formulación es la adecuada y la manera de llevar a cabo la vitrificación (tipo de horno) es correcta.

Al margen de lo indicado en el apartado anterior, la Tabla 7.6 muestra la relación atómica, también representada en la Figura 7.6, en los siguientes términos.

Tabla 7.6. Relaciones atómicas de los diferentes óxidos que intervienen en un vidrio

Función	Ejemplo	Vc/Va	Ra/Rc
Formador de vidrio	SiO_2	2	3,5
Estabilizador del retículo	Al_2O_3	1,5	2,5
Fundente (alcalinotérreo)	CaO	1	1,5
Fundente (alcalino)	Na_2O	0,5	1,5

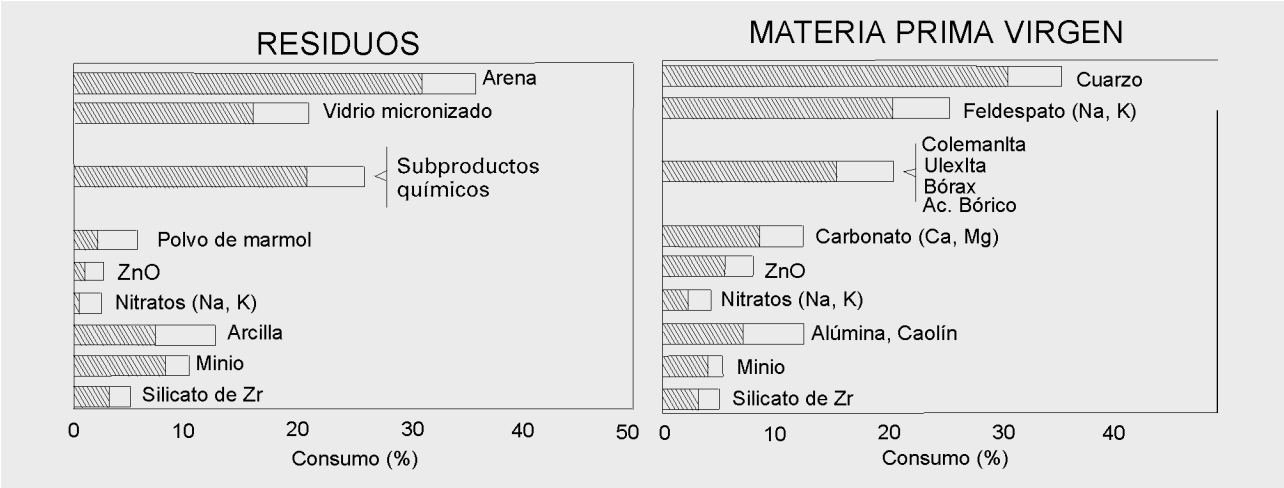


Figura 7.5. Residuos como materias primas de vitrificados.

Obsérvese que la secuencia Vc/Va y Ra/Rc es concordante con la fusibilidad. Es decir, el menor valor absoluto de los cocientes corresponde a los óxidos fundentes.

El gráfico de la Figura 7.7, reproduce un ejemplo de formulación de un vitrificado que funde alrededor de 1.300 ℃. En el eje de ordenadas aparecen los diversos óxidos, mientras que el eje de abscisas indica los intervalos de cantidades molares aconsejados para cada uno de ellos. Uniendo la máxima cantidad de álcalis con las máximas cantidades de SiO_2 y Al_2O_3 se consiguen unos «límites aconsejados» de formulación.

Un ejemplo típico de utilización del histograma de la Figura 7.7 puede ser el siguiente, a partir de un feldespato (ya que incorpora alúmina y sílice. Si el feldespato tiene un 12% de álcalis, 18% de Al_2O_3 y 70% de SiO_2), como mineral portador de SiO_2.

El valor de Al_2O_3 corresponde al mínimo posible para el análisis medio de feldespato del que se ha partido. Así, si se toman 0,3 moles (cantidad máxima de $Na_2O + K_2O$) la cantidad mínima incorporada de Al_2O_3 será 0,59 moles. La línea de mínima proporción para la elección de los moles de Al_2O_3 deberá ser siempre paralela a la recta «Al_2O_3».

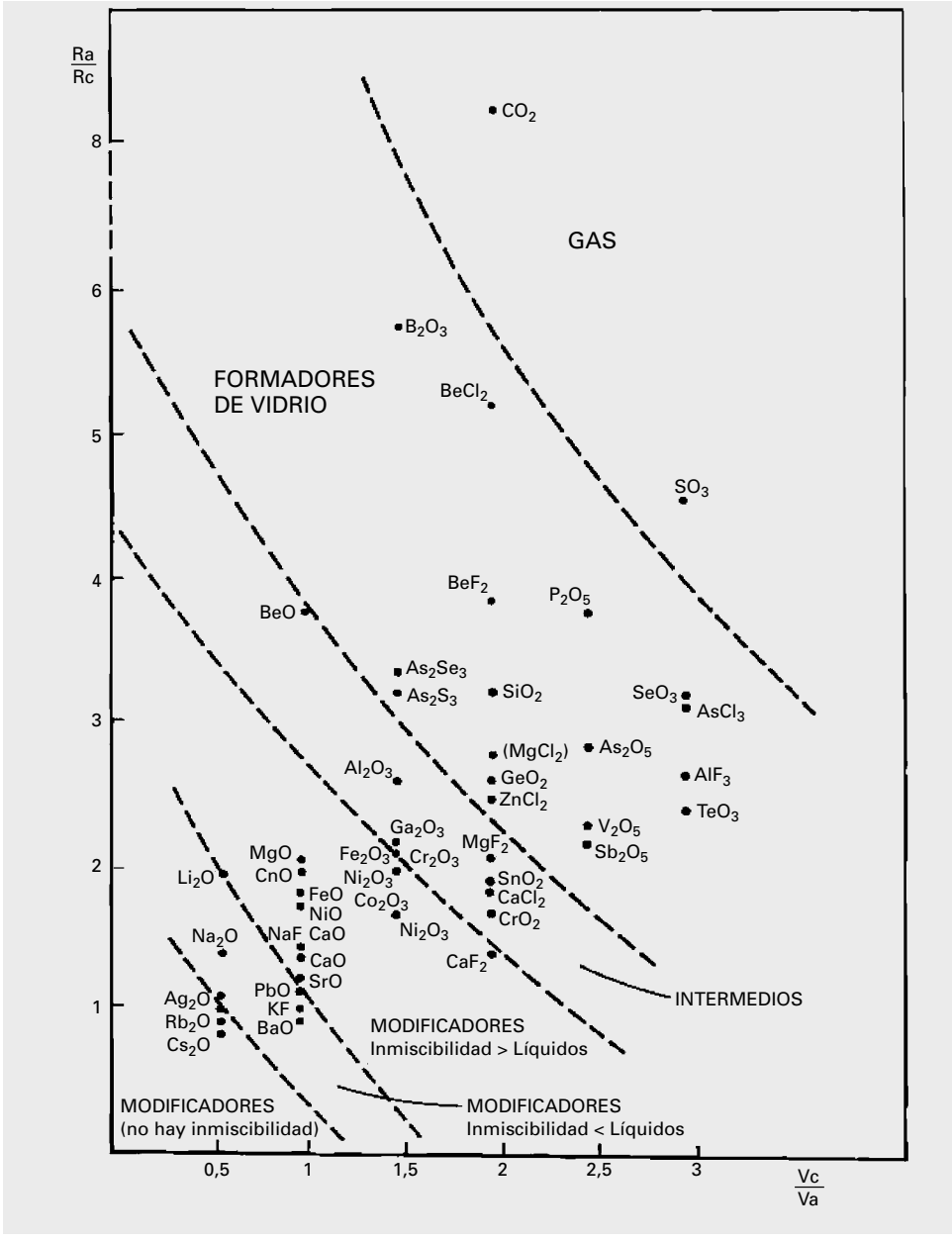


Figura 7.6. Elementos que pueden intervenir en un vidrio.

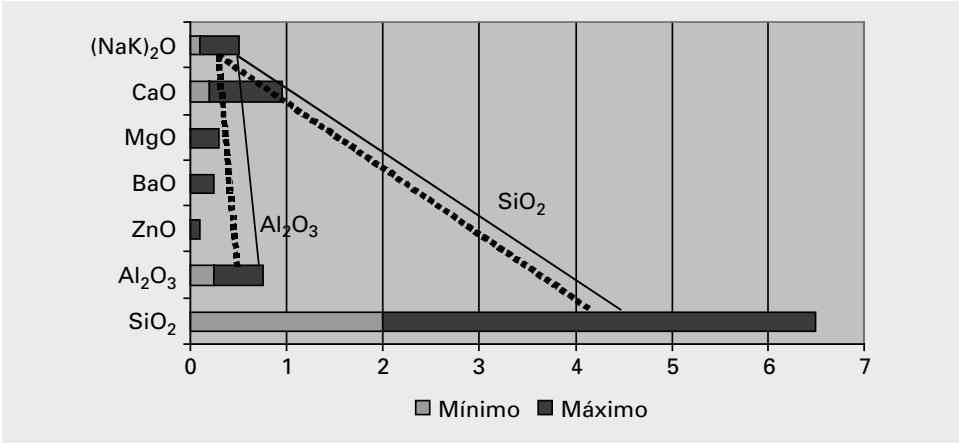


Figura 7.7. Límites de formulación de vitrificados (para un ejemplo de formulación).

El valor de SiO_2 corresponde al mínimo posible para el análisis medio de feldespato elegido. Siguiendo el mismo ejemplo anterior para 0,3 moles de álcalis, la cantidad mínima molar de SiO_2 será de 3,9 moles. Por esto todas las líneas de mínima proporción de SiO_2 deberán ser paralelas a la recta «SiO_2».

Para que el vitrificado sea formulable estas cantidades deberán ser algo superiores, por ejemplo en un 15%, o sea: 0,67. Haciendo lo mismo para el SiO_2, resulta un valor mínimo del SiO_2 de 4,2 que incrementado en un 15% supone 4,48 mols.

2.1.1. Desarrollo de los eutécticos en la vitrificación

La única manera de minimizar, o eliminar, la volatilización de óxidos y material particulado en la alimentación de los hornos es el empleo de los denominados hornos de «capa fría».

Para comprender lo que acontece en la «capa fría» de los hornos de vitrificación eléctricos es preciso recordar la definición de eutéctico. Un eutéctico es la asociación de dos o más sustancias, cuyo punto de fusión, en algunas proporciones de mezcla, es inferior al de cualquiera de los ingredientes por separado, y no corresponde a la media aritmética o ponderada como cabria esperar en primera instancia.

En realidad lo que ocurre es que, a medida que progresa el calentamiento de la mezcla, los componentes reaccionan y se va formando un compuesto nuevo, de punto de fusión definido inferior a los ingredientes y, a medida que crece su proporción, el punto de fusión de la mezcla va disminuyendo.

Se denomina intervalo eutéctico a toda una gama de proporciones de mezcla en que el punto de fusión es inferior a los de los ingredientes por separado y, dentro de este intervalo se sitúa el punto eutéctico, que corresponde al menor de los valores del punto de fusión, que coincide con la proporción de mezcla en que reaccionan estequiométricamente los ingredientes, para dar luz a un nuevo compuesto. La propia naturaleza muestra numerosos ejemplos de formación de eutécticos en los feldespatos.

En el mundo de los vidrios el SiO_2 los eutécticos tienen una importancia capital. Como cuarzo, la variedad más empleada y en función de la cantidad de impurezas que contenga, el punto de fusión se puede situar en torno a los 1.700 ℃. Sin embargo la Tabla 7.7, muestra el punto de fusión del óxido simple y las temperaturas de formación de algunos de sus eutécticos, ya sean binarios o terciarios.

En la misma línea, si en lugar de intervenir dos o tres compuestos, aparecen muchos, la posibilidad de formación de eutécticos es mayor. En este sentido se dice que los vitrificados en los que intervienen residuos van a ser más seguros, es decir resisten mejor la lixiviación, en la medida que hayan más óxidos diferentes.

La tabla anterior solo refleja unos pocos ejemplos pero se podrían incluir eutécticos en los que los halógenos juegan un papel preponderante. Este punto es trascendental en el tratamiento de residuos ya que con mucha frecuencia contienen halógenos, azufre e incluso trazas de compuestos orgánicos.

2.1.2. Presencia de gases en los vidrios

Con frecuencia, el volumen de gases que puede extraerse de una masa de vidrio fundida por un horno de gas, es mayor que el propio vidrio en el que se hallan disueltos y supera en varios órdenes de mag-

Tabla 7.7. Temperaturas de formación de eutécticos

Óxido simples		Eutécticos binarios				
Óxido	°C $_{óxido}$	Óxido	%	Óxido	%	°C $_{eutéctico}$
Li_2O	1.727	Li_2O	55	SiO_2	45	1.024
Na_2O	920	Na_2O	25	SiO_2	75	780
MgO	2.800	MgO	38	SiO_2	62	1.543
CaO	2.560	MgO	36	B_2O_3	64	1.142
BaO	1.923	CaO	38	SiO_2	62	1.436
ZnO	1.975	CaO	7	P_2O_5	93	490
PbO	880	BaO	46	SiO_2	54	1.380
B_2O_3	450	ZnO	65	B_2O_3	35	961
Fe_2O_3	1.565	PbO	84	SiO_2	16	715
P_2O_5	569	PbO	88	B_2O_3	12	493
CuO	1.148	PbO	81	Fe_2O_3	19	730
Eutécticos ternarios						
Óxido	**%**	**Óxido**	**%**	**Óxido**	**%**	**°C $_{eutéctico}$**
Na_2O	25	B_2O_3	30	SiO_2	45	530
Na_2O	19	FeO	63	SiO_2	18	720
CaO	38	B_2O_3	32	SiO_2	30	977
MgO	21	Al_2O_3	16	SiO_2	63	1.355
PbO	66	B_2O_3	30	SiO_2	4	484

nitud a los bajos valores de la solubilidad física. Esta gran diferencia indica que existe otro mecanismo que permite incorporar al vidrio grandes cantidades de gases que reaccionen químicamente con sus componentes estructurales. En líneas generales la interacción de los gases con el vidrio es de carácter físico a baja temperatura y de naturaleza química a alta temperatura.

En la fabricación de vidrio, la etapa más crítica es sin duda la de afinado. Las reacciones químicas que gobiernan el afinado químico determinan tanto la disolución como la segregación de los gases de la masa de los vidrios fundidos. Un ejemplo bien corriente de incorporación estructural de un gas en un vidrio es la del oxígeno. No obstante como se verá en el caso de la fusión eléctrica, hasta cierto punto puede reportar varias ventajas:

- La solubilidad química depende fundamentalmente de la presencia de iones polivalentes en estado de oxidación inferior y que, por consiguiente, pueden ser oxidados a una valencia superior, de acuerdo con el equilibrio redox. Esta particularidad es fundamental para la vitrificación de compuestos tan dañinos para las personas y el medio como es el arsénico.
- La fusión eléctrica permite trabajar sin oxígeno, o bien el estrictamente necesario para lograr efectos como el relatado anteriormente. En cualquier caso cuando haya seguridad de presencia de cloro, en atmósferas con exceso de oxígeno y agua (típicas de una combustión) parte del HCl, que en principio no es difícil de abatir, se transforma en cloro elemental que inexorablemente se emitirá a la atmósfera.

En el caso de la inertización de los residuos de arsénico por vitrificación, el As_2O_3 debe introducirse, en el caso de la fusión eléctrica acompañado de sustancias oxidantes, como sería el caso del nitrato potásico (o bien del carbonato), a su vez fundente. En una primera etapa se formará:

$$As_2O_3 + 2\ KNO_3 \rightarrow As_2O_5 + NO_2 + O_2 + K_2O$$

Más tarde, a la temperatura de afinado, se produce la disociación del pentóxido, liberando nuevamente el oxígeno retenido anteriormente:

$$As_2O_5 \rightarrow As_2O_3 + O_2$$

La gran ventaja del uso de los hornos eléctricos para el tratamiento de residuos con alto contenido en arsénico es que garantizan que todas las sales formen parte del silicato fundido, mientras que en los hornos abiertos convencionales hay un claro, y demostrado, peligro de emisiones.

2.2. VIDRIOS, FIBRAS, ESMALTES, VITROCERÁMICOS Y VITRIFICADOS

En función de la composición química y, en segundo lugar, de la curva de enfriamiento un vitrificado puede ser:

- *Vidrio.* Es decir su estructura es mayoritariamente amorfa y su forma geométrica de apariencia sólida (por ejemplo un vidrio botella).
- *Fibra.* Su estructura es esencialmente amorfa, o sea desde el punto de vista mineralógico es un vidrio, y su forma geométrica recuerda al algodón en rama.

- *Esmalte.* Su estructura es mayoritariamente cristalina (la cantidad entre fase amorfa y cristalina es muy variable). El cristal procede del vidrio y se forma en la etapa de enfriamiento (un ejemplo es el esmalte cerámico aplicado sobre un azulejo).
- *Vitrocerámico.* Su estructura es completamente cristalina, siempre formado a partir del vidrio inicial.

La Figura 7.8 indica los rangos en que se pueden diseñar los vitrificados.

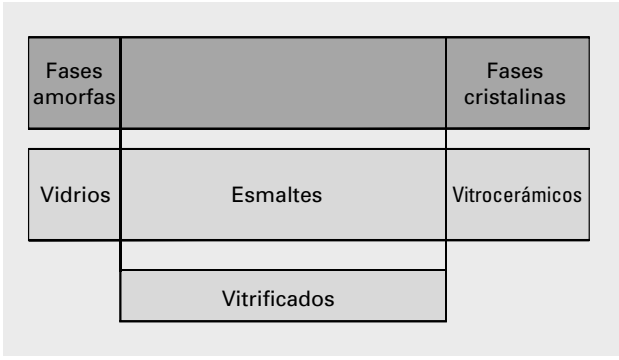


Figura 7.8. Rango de la mineralogía de los vitrificados.

Por lo general el residuo destinado a ser vitrificado se le deben añadir unos aditivos para corregir la formulación. Con ello se puede conseguir que la estructura final se acerque más a un vidrio (fase amorfa mayoritaria) o a un vitrocerámico (fases cristalinas mayoritarias).

El DVD adjunto, en el punto 2, se muestran ejemplos de vitrificados, vitrocerámica, vidrios y sus aplicaciones industriales.

2.2.1. Fibras minerales

Las fibras minerales, la más conocida es la lana de roca fabricada a partir de basaltos naturales, son interesantes de estudiar ya que presentan la posibilidad de ser usados para inertizar otros tipos de residuos conflictivos como los óxidos de cromo o níquel procedentes de los tratamientos electrolíticos de superficies.

En la terminología de las fibras de vidrio, se denomina «lana» a un entramado de fibras cortas. El término «lana de roca» se refiere a la naturaleza de los materiales de partida, siendo las más significativas:

- Fibras de vidrio, las materias primas son muy próximas a las usadas para la fabricación del vidrio ventana común.
- Fibras minerales, donde las materias primas son rocas, escorias u otras composiciones mixtas semejantes.
- Fibras cerámicas, las materias primas son caolines y cuarzo.

Las fibras, en su inmensa mayoría, tienen estructura absolutamente vítrea (amorfa). Ello supone una servitud clara de uso: no hay que exponerlas durante periodos de tiempo muy prolongados a las temperaturas de trabajo próximas a las teóricas de utilización ya que ello provoca una desvitrificación que acarrea graves alteraciones de sus interesantes propiedades térmicas. La más significativa es que la desvitrificación conlleva una densificación, que en términos prácticos se traduce en una contracción de la fibra y la consiguiente aparición de grietas. Por ellas penetra el flujo calorífico a alta temperatura llegando a un deterioro total del revestimiento.

Los numerosos poros ocluidos en el entramado de fibras, le confiere a la fibra unas propiedades muy singulares: baja conductividad térmica, absorción acústica, reducida densidad, incombustibilidad, repeler la presencia de microorganismos, etc.

La característica más sobresaliente de las fibras es su ligerísima densidad que corre paralela a su baja conductividad térmica. Las propiedades de aislamiento térmico de las fibras en general y de las fibras cerámicas en particular, poco tiene que ver con naturaleza del material del que están constituidas, ya sea su fórmula química o su mineralogía (amorfa o cristalina), sino con la manera en que se manufacturan las fibras una vez salen del horno. Durante la fabricación las fibras forman poros, tanto cerrados como abiertos. Obviamente, en la medida en que la naturaleza del vidrio sea más refractaria, la temperatura de utilización será mayor. La Tabla 7.8 expone las características más sobresalientes de las fibras usadas en la construcción de hornos.

La Tabla 7.8 indica que la temperatura en servicio continuo de las fibras es notablemente inferior a la que supondría el trabajo en régimen discontinuo. El motivo es que con el tiempo y la temperatura el vidrio desvitrifica, aumenta la contracción, la conductividad térmica y, finalmente la fibra se destruye.

Tabla 7.8. Características de diversas fibras

Composición	Naturaleza	T máxima (°C)	T en continuo (°C)
Sílice	Vítrea	1.050	
Sílice-Alúmina (45-50% Al_2O_3)	Vítrea	1.260	1.100
Sílice-Alúmina (55-60% Al_2O_3)	Vítrea	1.400	1.250
SiO_2-Al_2O_3-ZrO_2	Vítrea	1.400	
Alúmina (95% Al_2O_3)	Cristalina	1.700	1.600
Circonia (estabilizada con Y_2O_3)	Cristalina	2.100	
Carbono	Amorfa	1.800-2.500 (*)	
Grafito	Cristalina	2.200-2.500 (*)	

(*) Temperaturas en vacío. En atmósferas oxidantes, la oxidación comienza a 300 °C. En atmósferas neutras, la temperatura máxima puede alcanzar los 3.000 °C.

El comportamiento de estas fibras frente a los ácidos en caliente es bastante bueno. Existen, sin embargo otras limitaciones de empleo que tienen que ver con la atmósfera del interior del horno:

- La presencia de álcalis, fluoruros y sulfatos, provocan un ataque a las fibras por formación de vidrios de menor punto de fusión.
- Las fibras de sílice son sensibles a las atmósferas reductoras. También precipita el carbono procedente del CO en el interior de las fibras.
- Las fibras silicoaluminosas, a temperatura inferior a 900 ℃, admiten atmósferas ricas en hidrógeno (hasta un 10%) y en CO (hasta un 20%).
- El vacío también reduce la temperatura de servicio.

La aplicación más usual es la de aislamiento térmico, sin embargo cada vez su empleo es mas frecuente en la fabricación de composites como material de refuerzo en matrices de resinas, metales, cerámicas, etc.

El diámetro de estas fibras, según el tipo, oscila de 10 a 150 mm, o sea varios ordenes de magnitud superior a las de amianto. Por esta razón, estas fibras han ido sustituyendo a los materiales que antes se fabricaban con fibras de amianto.

La lista de materiales empleados para la fabricación de las lanas de roca: basalto, granito, pizarra, caliza, diabasa, gabro, etc., entre las rocas y escorias metalúrgicas procedentes de altos hornos y de otros metales como cobre, plomo o cromo, entre los residuos. La Tabla 7.9 expone la composición química de dos tipos de basalto usados para la fabricación de lanas de roca.

Estas rocas funden alrededor de 1.400 ℃ y, a la salida del horno, se pueden fibrar. La densidad real de las fibras obtenidas oscila entre 2.100 y 2.400 kg/m^3 (mientras que la aparente, en forma de mantas, es del orden de 150 kg/m^3). La fabricación de fibras a partir de basalto natural mejora ostensiblemente cuando se le adiciona residuos ricos en calcio y magnesio. Los tamaños de fibra suelen oscilar de 5 a 25 mm. La temperatura máxima de trabajo de las fibras de basalto, con residuos, se sitúa alrededor de los 500 ℃.

El DVD adjunto, en el punto 3, se muestra información complementaria sobre diversos tipos de fibras para usos industriales.

2.2.2. Fibras de amianto

Amianto (palabra latina: incorruptible) o asbesto (griega: incombustible) es una fibra mineral que por sus características tecnológicas excepcionales como incombustibilidad, buen comportamiento térmico, mecánico, a la agresión química, aislante eléctrico y resistente a los microorganismos se ha utilizado en centenares de aplicaciones.

Tabla 7.9. Caracterización de rocas para fabricación de lanas de roca

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	TiO_2	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	P_2O_5	PF
Basalto 1	43,2	15,6	3,17	7,96	4,1	11,5	5,3	4,8	0,8	0,04	1,1	1,8
Basalto 2	50,1	18,4	2,69	4,9	2,7	8,4	2,9	5,2	1,7	0,03	1,2	1,1

La problemática ambiental, y sanitaria, de la fibra deriva del hecho que al tener un diámetro inferior a 3,5 mm, la posibilidad que alcance los alvéolos pulmonares es elevadísima. La pneumoconiosis se caracteriza por una fibrosis pulmonar asociada a largas exposiciones a fibras de amianto que se traduce en un endurecimiento de las paredes alveolares y en consecuencia a una inhabilitación progresiva para transferir el oxígeno de los alvéolos a la sangre provocando, a la larga, cuadros de insuficiencia cardiaca. Después de una latencia de unos 20 años el problema suele degenerar en cáncer de pulmón. La dosis mínima desencadenante de la enfermedad puede ser muy pequeña y variable, según sea la clase de amianto, el tipo de exposición y la susceptibilidad individual. En 1999 se aprobó la Directiva 199/77/CE que prohíbe totalmente el uso de cualquier forma y variedad de amianto en todos los países de la UE a partir de 2005. La Taba 7.10 muestra las características de las especies más importantes de amianto.

Si bien, solo en Francia se han encontrado más de 3.000 referencias comerciales, las principales aplicaciones son el fibrocemento (10-20% de fibras y el resto cemento), los productos aislantes, la protección de estructuras metálicas, tuberías, depósitos de agua, zapatas de freno, etc. El período de máxima utilización de estos materiales fue entre 1950 y 1980.

Una vez haya constancia de la presencia de amianto el peligro estriba en que su remoción o demolición genere polvo que pueda ser inhalado por las personas, por ello el párrafo siguiente propone diversos sistemas de actuaciones. En primer lugar el plan propuesto debe ser aprobado por la autoridad ambiental competente.

- *Estabilización.* Se debe aplicar una resina acrílica, vinílica o similar. Esperar a que se seque. Aplicar un endurecedor superficial. Recubrir con un elastómero para asegurar la estanqueidad. Es aplicable en materiales no degradados, en zonas sin choques ni vibraciones ni corrientes de aire. Hay que controlar su estado de manera periódica. Exige documentar las zonas tratadas, de cara a futuras actuaciones.
- *Confinamiento.* Recubrir el material con una nueva estructura de obra (tabique) o un recubrimiento reforzado con malla metálica. Requiere soportes sólidos. Se aplica a zonas sin posibilidad de mantenimiento. Exige documentar las zonas tratadas, de cara a futuras actuaciones.

Tabla 7.10. Caracterización de los principales minerales de amianto

	Crocidolita	**Crisotilo**	**Amosita**
Naturaleza	Silicato Fe y Na	Silicato Mg hidratado	Silicato de Mg y Fe
Composición química, en %			
SiO_2	50-56	3-42	Aprox 50
FeO	4-20	0-2	Aprox 40
Fe_2O_3	13-18	0,3-1,5	—
MgO	1-3	38-43	Aprox 6,5
Na_2O	6-7	—	—
H_2O	2-3	11-14	Aprx 2
Diámetro fibrilla (m)	0,08	0,02	0,1
Diámetro fibra industrial (m)	1-2	0,1-1	1-2
Longitud máxima fibra (mm)	70	40	70
Flexibilidad	Buena	Excelente	Baja
Aptitud para hilar	Baja	Muy buena	Baja
Resistencia química	A los ácidos	A los álcalis	A los ácidos
Superficie especifica (cm^2/g)	20.000	90.000	20.000
Densidad real (kg/m^3)	3.330	2.550	3.450
Temperatura de degradación °C	400-600	450-700	600-800

- *Desamiantado.* Retirada del amianto o material que lo contiene. Se recomienda cuando el material está en mal estado. La envergadura de la operación depende del futuro uso de la obra o lugar. Es una operación muy costosa e implica conocimientos profundos del material y la legislación.
- *Valorización por vitrificación.* Como se verá en el apartado correspondiente al tratamiento del amianto, la vitrificación es una práctica más o menos frecuente. Vitrificar el silicato por si solo es difícil, no obstante mezclado con otros materiales que facilite la operación y reduzca la temperatura de trabajo es una operación muy fácil y barata. El material vitrificado, absolutamente inerte, puede emplearse como grava para la fabricación de hormigones.

2.3. ACABADO DE LOS MATERIALES VITRIFICADOS

Una vez vitrificado, el material fabricado a partir de residuos permite ser presentado en diferentes formas. La obtención de uno u otro acabado depende, principalmente, de la manera en que el líquido incandescente abandona el horno. El parámetro que más influye en esta decisión es de carácter eminentemente económico. Las formas físicas básicas son las siguientes:

- *A granel, en forma de grava.* Es la forma que adopta el vidrio al caer directamente en agua fría (frita).
- *Baldosa.* El vidrio se deja caer en un molde de acero refrigerado; la pieza extraída se introduce en un arca para eliminar tensiones térmicas.
- *Material fibroso.* El vidrio al salir del horno se centrifuga en un crisol de platino. La gota de vidrio se enfría y la fuerza centrífuga lo estira hasta adquirir la forma adecuada.

2.3.1. El vitrificado a granel

Resumidamente se ha descrito, en el párrafo anterior, las diversas aplicaciones de la tecnología de vitrificación al tratamiento de residuos. La grava es la variedad que tiene un menor valor añadido, ya que puede ser sustituido por grava natural. La Figura 7.9 muestra algunos ejemplos de vitrificados a granel.

La imagen central de la Figura anterior representa el vitrificado enfriado en agua, mientras que las otras dos fotografías corresponden a vitrificados enfriados en aire. La aplicación de todos estos vitrificados es el uso a granel. Existe una variante de utilización del vitrificado que consiste en la sustitución de grava en la formulación de hormigones.

La Figura 7.10 muestra una aplicación del vitrificado como grava para la fabricación de «arrecifes» artificiales, adecuados para el litoral marino y controlar el efecto de olas y temporales para prevenir que un fuerte temporal se «lleve la playa». Esta aplicación es especialmente adecuada cuando una parte de los metales que integran el vitrificado son isótopos radiactivos y requieren refrigeración natural para evitar que el calor producido por la constante emisión de partículas α pueda provocar roturas por dilataciones locales.

También se pueden fabricar paneles de hormigón armado u hormigón en masa para aplicarlos en grandes obras públicas.

2.3.2. El vitrificado conformado en forma de baldosa

La forma de obtención consiste en dejar caer el vidrio en forma líquida e incandescente dentro de un molde de acero. Una vez se ha sacado la pieza del molde, se introduce en un arca de recocido para eliminar tensiones. La Figura 7.11 muestra la imagen de una baldosa fabricada con cenizas de fangos de EDAR.

Figura 7.9. Imagen de diversas formas de vitrificados a granel.

Figura 7.10. Imagen de «arrecifes» artificiales empleados en litoral marino.

El color de la baldosa implica la presencia de metales cromóforos; si el vitrificado no incorporase metales pesados sería transparente. El acabado superficial se puede modificar en textura y color. Una característica importante es que siendo el vidrio totalmente impermeable, una baldosa de este tipo no se mancha con aceite.

La baldosa, o similar, es el acabado ideal para la fabricación de paneles adecuados para arcenes en autovías y autopistas, para actuar como barreras acústicas reflectantes: el vidrio es un material sin poro, por lo que no absorbe ondas acústicas sino que las refleja. La Figura 7.12 muestra una posible aplicación.

También es posible fabricar vidrio celular o poroso, y otros materiales similares. En definitiva, la conclusión es la misma desde el punto de vista económico: aún tratándose del mismo material de base, la venta del vitrificado en forma de producto manipulado le proporciona un mayor valor añadido.

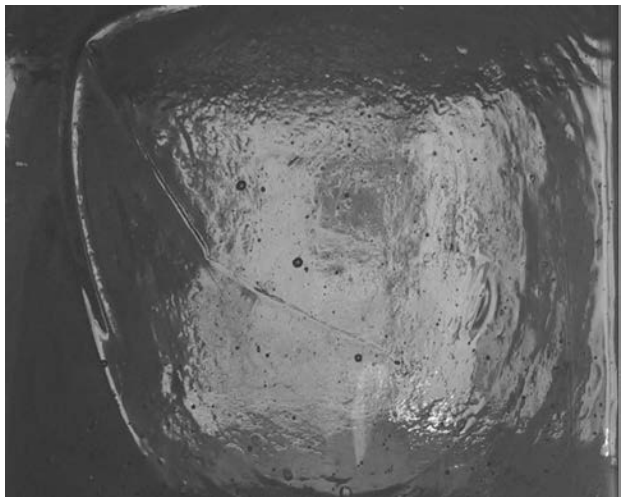


Figura 7.11. Imagen de una baldosa de vidrio fabricada a partir de fangos de EDAR.

2.3.3. Materiales fibrosos a partir de vitrificados

Para la fabricación de materiales fibrosos es preciso centrifugar el líquido cuando cae incandescente. Las microgotas de vidrio atomizadas se transforman en cuerpos con una cabeza aproximadamente esférica y una larga cola. Las fibras se cardan y se manipulan de diversos modos para la fabricación de paneles, fibras en forma de mantas, etc. La Figura 7.13 reproduce una fotografía, con un microscopio electrónico, de una fibra de vidrio. La fabricación de las fibras es costosa, pero el valor añadido es infinitamente superior a las otras modalidades de acabados.

El vidrio es apto para adoptar cualquiera de las formas descritas anteriormente, aunque es lógico que deban realizarse ajustes en sus formulaciones.

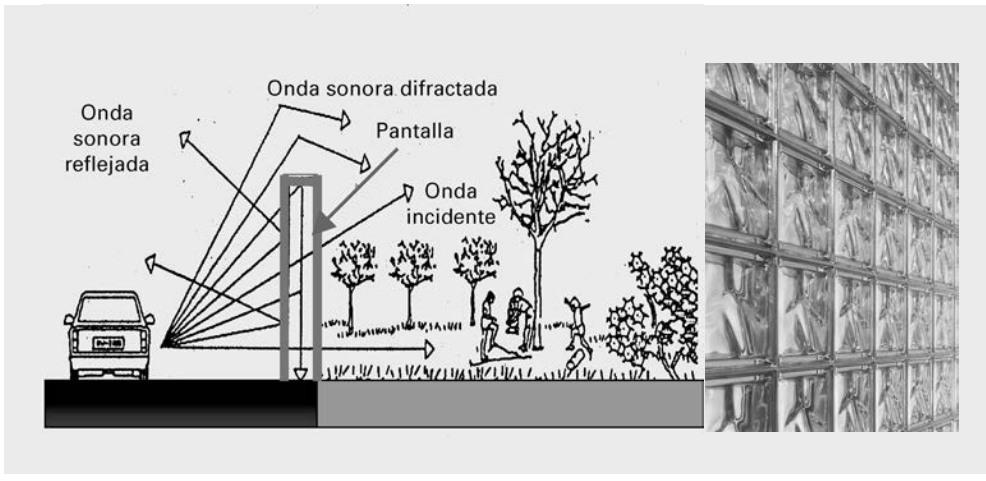


Figura 7.12. Esquema de una pantalla acústica reflectante.

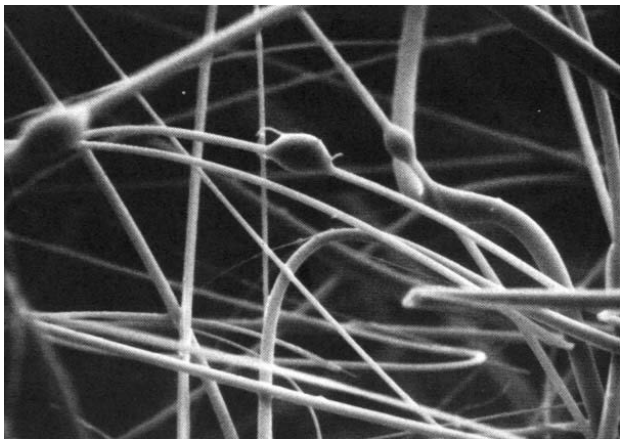


Figura 7.13. Fotografía con microscopía electrónica de una fibra de vidrio, donde puede observarse su cabeza esférica y su larga cola.

De hecho ésta es la aplicación a que se hace referencia en los apartados 2.2.1 y 2.2.2 anteriores.

2.3.4. Aplicaciones fotovoltaicas

La tecnología de la vitrificación, combinada con la de plasma, es tan valiosa que permite transformar residuos inorgánicos en paneles fotovoltaicos de alto valor añadido.

La primera parte de la aplicación consiste en fabricar con residuos (obviamente el soporte se puede elaborar con materiales vírgenes pero, en este apartado se trata de explorar y conseguir las máximas posibilidades que permite la vitrificación) un soporte con una superficie adecuada y un espesor que permita su posterior conformación. Es decir, una vez obtenida una baldosa (soporte) se introduce en un horno de «*flussing*» para lograr una geometría adecuada, por ejemplo una teja, ya sea romana o árabe.

2.3.4.1. Materiales semiconductores intrínsecos

La conductividad eléctrica de los materiales semiconductores no es tan elevada como la de los metales (los semiconductores, también llamados aislantes, tienen una zona, intervalo prohibido de energía, que los electrones de valencia: banda de valencia, no pueden traspasar). Sin embargo, ostentan algunas particularidades que los hacen especialmente útiles. Quizá la más importante es que son extremadamente sensibles a la presencia de pequeñas concentraciones de impurezas. Según la naturaleza de estas impurezas los semiconductores se clasifican en intrínsecos (si el comportamiento eléctrico es inherente al material puro) o extrínsecos (si las características eléctricas están determinadas por los átomos de impurezas).

En términos sencillos, un dopante intrínseco es aquel que permite al electrón del semiconductor atravesar la zona de «intervalo prohibido» de energía cuando el material es excitado por el fotón solar, o simplemente calor. A medida que la fuente de excitación sea más potente y duradera, la energía comunicada es mayor y los electrones de valencia son capaces de saltar la zona prohibida y convertirse en un electrón libre en la denominada zona de conducción y, por tanto, conductor eléctrico. Los semiconductores elementales, de valencia 4 y enlace covalente, son de Si y Ge, los cuales tienen intervalos prohibidos de energía de, aproximadamente 1,1 y 0,7 eV.

2.3.4.2. Concepto de «hueco electrónico»

En los semiconductores intrínsecos, cuando el electrón excitado ha atravesado la zona prohibida, aparece un hueco o vacante electrónica en la banda de valencia. Otro electrón llegará a ocupar su lugar, de manera que se establece un flujo constante de electrones.

2.3.4.3. Semiconductores extrínsecos

Sin excepciones, todos los semiconductores comerciales son extrínsecos, esto es, su comportamiento eléctrico está determinado por sus impurezas. Los denominados semiconductores de *tipo n*, están integrados por elementos del grupo VA de la tabla periódica (como por ejemplo P, As y Sb). Si se dopa el Si, elemento que dispone de 4 electrones de valencia que forman el enlace covalente, con uno de estos elementos, que tienen 5 electrones de valencia, el electrón sobrante quedará débilmente ligado por fuerza electrostática en la región en torno al átomo de impureza. Este electrón está situado precisamente en la zona prohibida y se denomina donante.

El efecto contrario a lo visto con la conducción extrínseca tipo *n*, sucede al introducir en el silicio impurezas de elementos del grupo IIIA, como el Al, B o Ga. Uno de los enlaces covalentes en torno a estos átomos de impureza es deficitario de un electrón, situación que puede asimilarse como un hueco débilmente ligado al átomo de impureza. Dicho hueco puede liberarse por la transferencia de un electrón desde uno de los enlaces adyacentes. Un hueco móvil se considera un estado excitado y participa en el

proceso de conducción de modo análogo a un electrón excitado de un estado donador. Por esta razón a las impurezas de este tipo se las denomina «aceptor» o semiconductores extrínsecos de *tipo p*.

2.3.4.4. Aplicación por plasma en capa fina

Posteriormente a la fabricación del vitrificado, por medio de plasma se aplica una capa fina del soporte que, en la actualidad puede ser de materiales amorfos (Si, GaAs, SiGe, TiO_2, CdTe, etc.) con un alto grado de desorden en la estructura. Seguidamente, y según la tecnología seguida, se deben aplicar dos capas más y finalmente dopar la última capa. La construcción es simple y barata, si bien la eficiencia es también limitada (del orden del 8%).

La tecnología de los materiales cristalinos y policristalinos es de mayor efectividad (>20%) y costo mucho más elevado. El mas eficiente es el Si, monocristalino. Sin embargo, se está investigando mucho con materiales orgánicos polímeros o moleculares. Los fulerenos parecen ser los de futuro más prometedor.

En la tecnología de capa fina, se colocan capas muy finas (1 µm) sobre un soporte o capa de vidrio. Para ello es suficiente 1 g de semiconductor de Si amorfo por m^2 de superficie.

El acabado que permite el plasma equivale a una superficie muy homogénea lo que facilita la aplicación para elementos de geometrías complicadas como tejados y revestimientos.

El DVD adjunto, en el punto 4, muestra diversa información sobre paneles fotovoltaicos.

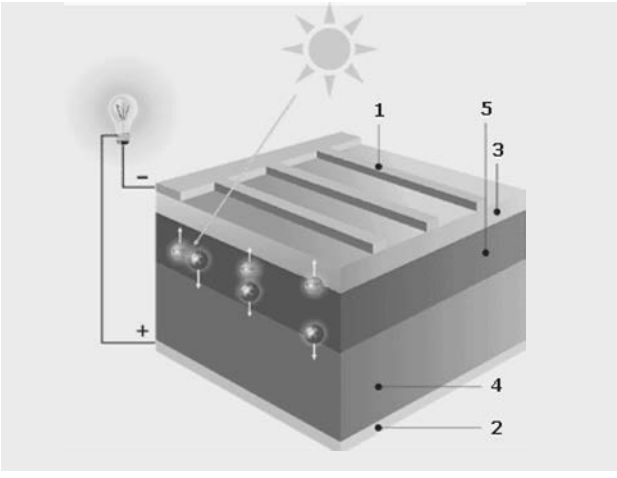


Figura 7.14. Aplicación fotovoltaica en capa fina.

2.4. TEXTURA Y FORMULACIÓN DE UN VITRIFICADO

La formulación de un vitrificado constituye una auténtica especialidad y debe hacerse a partir de los residuos disponibles añadiéndole unos correctores para conseguir una correcta fusión, sobre todo dentro de un rango de temperaturas económicamente asequibles y que el vitrificado corresponda a la zona de formulación deseada.

En primer lugar el vitrificado se diseña a partir de la fórmula molar de los diversos óxidos que intervienen agrupados por sus grupos homogéneos: fundentes, estabilizadores y formadores de red.

Seguidamente se expone un ejemplo. Se desea inertizar unos subproductos que contienen carbonatos de bario y de estroncio. La gama de temperaturas de fusión se fija en 1.300-1.400 ℃. Para aprovechar al máximo la inserción de las citadas sales, se diseña una fórmula molar (fórmula de Seger) que responde al esquema reproducido en la Tabla 7.11:

Tabla 7.11. Fórmula Seger de un vitrificado

Óxidos fundentes	Óxidos estabilizadores	Óxidos formadores
0,21 NaKO 0,29 SrO 0,12 CaO 0,38 BaO	0,31 Al_2O_3	3,00 SiO_2
1,00	0,32	3,00

Según esta metodología la suma, molar, de la columna de los óxidos fundentes debe ser la unidad. De esta forma es fácil hallar los porcentajes de peso de cada uno de los grupos de óxidos:

- % Óxidos fundentes: 23,20
- % Óxidos estabilizadores: 7,19
- % Óxidos formadores: 69,61

El porcentaje, en peso, de materias primas necesarias para conseguir la citada fórmula Seger es:

- % Carbonato de bario: 22,1
- % Carbonato de calcio: 2,7
- % Carbonato de estroncio: 11,6
- % Feldespato: 25,3
- % Arcilla caolínitica: 2,2
- % Pirofilita: 6,0
- % Cuarzo: 30,1

Una vez elegida una determinada composición, la estructura de los óxidos fundentes define una familia

de vidrios. A partir de aquí es posible ir modificando las características del vitrificado a base de retocar, tan sólo, la relación SiO_2/Al_2O_3. Como indica la Figura 7.15 alterando esta relación es posible obtener vitrificados al borde de la fusibilidad (poco fundidos o crudos), acabados mates, semimates, brillantes y desvitrificados.

Es obvio que la elección de la zona no obedece al azar. Cada una de estas zonas da lugar a un vidrio de características fisicoquímicas definidas. Así, los vidrios mates tienen un aspecto que recuerda a una roca sin pulir, son ásperos y muy duros. Esta última propiedad sería la determinante para una aplicación específica (por ejemplo, destinar el vitrificado a balasto para vías de ferrocarril).

Los vidrios semimates suelen presentar una gran resistencia al ataque de los ácidos y bases. Los brillantes se prefieren cuando se pretende valorizar directamente el residuo para transformarlo en una grava más estética. Esta aplicación sería la más indicada cuando se pretende inertizar compuestos con metales pesados que puedan estar sometidos a fuertes agresiones químicas.

La diferencia básica entre la zona de desvitrificación y el mate es que, en ésta última hay una gran recristalización uniforme y controlada en todo el seno de la matriz vítrea, mientras que la zona de desvitrificación corresponde a aquellas composiciones en las que una, o más fases de la matriz principal, se segregan para recristalizar.

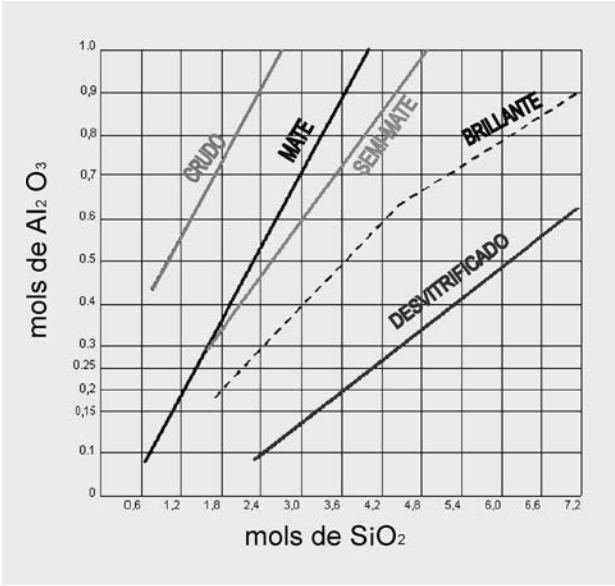


Figura 7.15. Textura de los vitrificados.

3. La vitrificación como tecnología industrial

La Figura 7.16 esquematiza un horno de fusión para la producción de vitrificados, y se aprecia el detalle del quemador de apoyo para lograr una perfecta salida del fundido. Los hornos suelen ser de crisol calentados eléctricamente, para reducir la emisión de gases, o por combustibles fósiles convencionales. El material a vitrificar entra por la parte superior y cae sobre la superficie del líquido ya fundido. La colada se efectúa por la parte inferior y cae directamente sobre un depósito lleno de agua, donde solidifica (subenfría) y se rompe en pequeños pedazos.

Figura 7.16. Salida del vitrificado en un horno de gas.

El fundido sale a una gran temperatura y al precipitarse sobre agua fría queda sometido a un gran choque térmico que consigue mantener la estructura vítrea del material. Además, se logra un material solidificado de forma geométrica muy parecido a los granos de arroz, de esta manera se puede manipular instantáneamente.

El material así obtenido se denomina «frita». Se trata de un vidrio sobreenfriado y, si la composición es la correcta, resulta totalmente inerte.

Una frita podría definirse como un producto prefundido. De hecho es un auténtico vitrificado. Esta tecnología surgió como imprescindible para poder incluir en la formulación de los esmaltes aquellas

materias que tienen cierta tendencia a volatilizar (como el Pb) o son solubles en agua. La mayor parte de las sales alcalinas son solubles en agua. Si se prepara una suspensión que contenga productos solubles, cuando se evapore el agua arrastrará a la sal.

Por la misma razón que las fritas son ampliamente utilizadas para preparar los esmaltes cerámicos, el mismo principio de funcionamiento se aplica a la formulación de vitrificados que incorporen residuos con sales solubles. Un esmalte cerámico suele ser la combinación de una frita y materias primas crudas (sin previa fusión) esta mezcla facilita la fusión del conjunto puesto que una parte de ella ya es vidrio. En la medida que los procesos de cocción de azulejos, y de otros materiales cerámicos, se han racionalizado y logrado acortar el tiempo de calentamiento, se ha pasado de ciclos de cocción de 12-20 horas de frío a frío a 20-40 minutos, las prestaciones de los esmaltes han tenido que adaptarse. En cuanto al control de calidad la frita supone una clara ventaja ya que garantiza una fórmula química precisa. Durante la fabricación de la frita, las composiciones se analizan y corrigen constantemente, mientras que las materias primas naturales están sujetas a cambios de composición que, a veces, afectan de manera muy importante al comportamiento de los vitrificados.

Desde el punto de vista mineralógico y debido sobre todo a la forma de obtención, enfriamiento instantáneo, la estructura de una frita es vítrea al cien por cien, mientras que la de un esmalte es vítrea con una proporción variable de material recristalizado.

Una característica a destacar es que, a diferencia de la mayoría de los procesos de tratamiento estudiados, en la vitrificación el material pierde la geometría original, por cuanto funde completamente. Desde el punto de vista ambiental los dos grandes problemas de la vitrificación se pueden reducir a:

- La presencia de carbonatos. No conviene, en lo posible, vitrificar carbonatos. Con la temperatura, siempre inferior a la de formación de líquido, el carbonato se descompone y el CO_2 es expulsado violentamente con el consiguiente peligro de arrastre de material particulado. Algo semejante acontece con la humedad de los materiales a vitrificar, si bien la salida del vapor se hace a temperaturas inferiores y de forma paulatina y menos violenta.
- La emisión de metales, halógenos y materia orgánica presente en los materiales a vitrificar.

La contención, o minimización, del efecto generado por la expulsión del CO_2 es función exclusiva de la formulación (sería mejor llevar a cabo una calcinación previa de los carbonatos a la vitrificación), mientras que la emisión esta directamente relacionada con el tipo de vitrificador elegido.

3.1. TIPOS DE VITRIFICADORES

Industrialmente existen tres modalidades de hornos para llevar a cabo la fusión de vidrios o vitrificados:

- Hornos abiertos convencionales. Que usan combustibles fósiles ya sea fuelóleo o gas natural y aire como comburente.
- Hornos abiertos convencionales, que usan gas natural con aire muy enriquecido u oxígeno. Son los llamados de oxicombustión.
- Hornos de fusión eléctricos.

3.1.1. Hornos de fusión abiertos convencionales

A titulo de definición es preciso explicar que el adjetivo «abierto» se refiere al hecho de que los gases de combustión son evacuados al exterior por una chimenea, después de atravesar un sistema de lavado de gases o no.

La necesaria heterogeneidad de las materias primas (fundentes, formadores de vidrio, etc.) y en especial cuando se trata de residuos, conduce a una fusión progresiva de las materias primas en etapas bien diferenciadas. Por esto el sistema de fusión elegido condiciona la emisión de material particulado.

La Figura 7.17 reproduce el principio de funcionamiento de un horno de fusión continuo de balsa con calentamiento a partir de la combustión de un combustible gaseoso (De hecho corresponde al horno de la Figura 7.18). En términos generales los gases de combustión suelen arrastrar bastante material particulado y, según como se diseñe la mezcla de los componentes a fundir, algunos metales pesados. Por tanto es inevitable una depuración posterior de los gases.

El principio de funcionamiento del horno de balsa abierto es bien conocido. La combustión desarrolla una gran cantidad de energía que es transferida a las paredes y, obviamente a los propios gases. A la vez el calor se transfiere, básicamente por radiación hacia la carga hasta que funde. En la industria, para

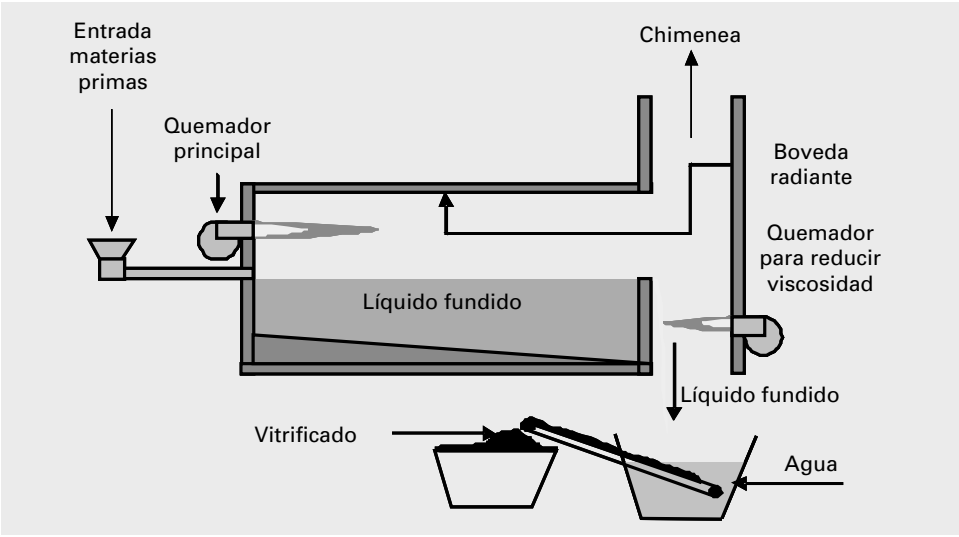


Figura 7.17. Esquema de un horno de vitrificar continuo abierto a gas.

conseguir temperaturas superiores a los 1.500 ℃ es preciso usar aire enriquecido con diferentes cantidades de oxígeno. Si no es necesario llegar a estas temperaturas se puede prescindir del enriquecimiento con oxígeno.

A medida que va fundiendo el material éste se torna más líquido y se va desplazando hacia la salida donde el horno dispone de un quemador para reducir la viscosidad de manera drástica y permitir la colada.

En el caso del horno como el de la Figura 7.17, la atmósfera que está por encima del líquido se halla a elevada temperatura. Cuando la carga incide sobre la superficie del baño la temperatura puede llegar a volatilizar ciertas sustancias. En otras palabras, no existe gradiente térmico para la materia prima. Sin solución de continuidad pasa de la temperatura ambiente a la del baño.

Por otro lado la velocidad media de los gases en el interior de la cámara de combustión, que con frecuencia supera los 2 m/s es suficientemente elevada como para provocar el arrastre de las partículas. La Figura 8.18 muestra una foto del interior de la cámara de combustión de un horno convencional de fritar esmaltes para la industria de los azulejos.

En la pared frontal del fondo (a la izquierda) se observa la salida de gases del quemador principal y, a su lado, la entrada de las materias primas. Los gases rebotan el la pared trasera y salen justo al lado del quemador (arco de la parte derecha).

En la variante de oxicombustión, se emplea el mismo tipo de horno pero ahora el comburente es aire enriquecido con lo cual la temperatura es mucho más elevada, el gasto de combustible menor y la cantidad de gases generados muy inferior con lo que se reducen los problemas de emisión. Es obvio que, para el tratamiento de residuos peligrosos, en el caso de llegar uno de ellos, el más recomendable sería este último.

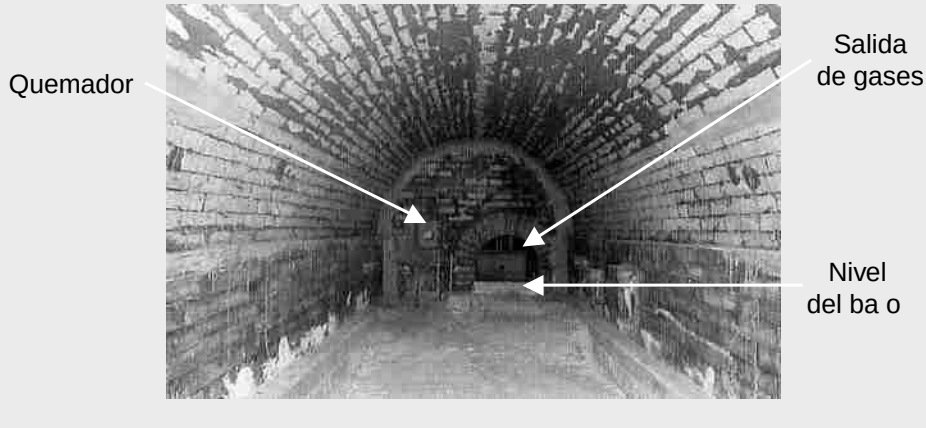


Figura 7.18. Interior de un horno de fritar de gas.

3.1.2. La fusión en un horno eléctrico

Existen dos tipos básicos de fusión eléctrica:

- Fusión en horno de arco.
- Fusión en horno de electrodos sumergidos.

Desde el punto de vista ambiental, básicamente cantidad y calidad de emisiones, el horno de arco, como el representado en la Figura 7.19, representa un claro avance con respecto al de oxicombustión, puesto que, en teoría no hay emisiones gaseosas (realmente es solo en teoría ya que la elevada temperatura interior provoca volatilizaciones indeseables).

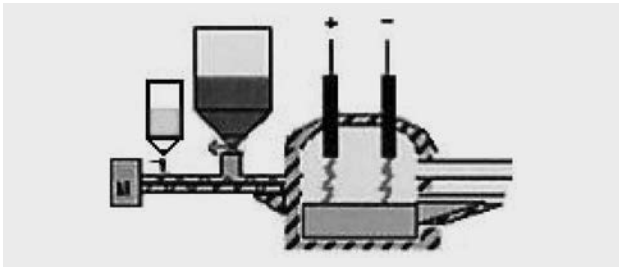


Figura 7.19. Horno de vitrificación de arco.

En estos hornos, los electrodos se hallan situados en la bóveda y hacen las veces de quemadores. El propio electrodo se consume y va, poco a poco, saliendo con los gases. Por todo ello es preciso instalar una línea de tratamiento de gases antes de su emisión a la atmósfera.

La otra variedad de hornos eléctricos son los denominados de «capa fría», donde los electrodos están sumergidos en el baño. En esencia, el horno de este tipo consta de una balsa en cuyo interior se halla el material a fundir. En el interior de la balsa existe una determinada cantidad de electrodos. Cuando el material funde (efecto que durante la puesta en marcha debe realizarse con un quemador auxiliar de gas) se torna conductor. A partir de este momento se puede apagar el quemador auxiliar.

En estos hornos, el material, como muestra la Figura 7.20, fluye por la parte inferior y efectúa un recorrido longitudinal que finalmente es ascendente. Con ello se logra un tiempo de residencia del vidrio muy prolongado que ayuda al afino. Finalmente el material se vierte por la parte superior (de hecho hace una especie de sifón). De esta manera se puede controlar la viscosidad y el caudal de forma exacta.

La sección transversal del horno es de forma poligonal de esta manera se potencian las corrientes convectivas internas. En general, a igualdad de producción tienen un volumen sensiblemente menor que los convencionales de gas o de combustible líquido. Con ello se reducen las pérdidas de calor a través de las paredes.

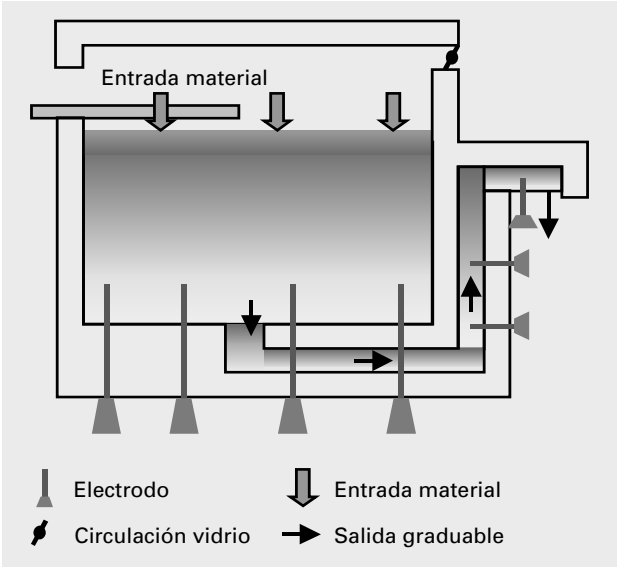


Figura 7.20. Esquema de funcionamiento de un horno eléctrico de capa fría.

3.1.3. Importancia de la atmósfera interior del horno

En los hornos de vitrificar y fritar convencionales la atmósfera es, al menos en teoría, oxidante ya que trabajan con un ligero exceso de aire que oscila del 5 al 15%. En cualquier caso está asegurada la presencia de oxígeno en los gases. Ahora bien como enseñan los diagramas de combustión y la realidad se encarga de constatar, siempre o casi siempre hay cantidades importantes de gases reductores principalmente CO y H_2.

Además en la cámara de combustión se hallan presentes una gran cantidad de hidrocarburos. No obstante el elevado tiempo de residencia de los gases, algo más de dos segundos en la mayoría de los hornos y la alta temperatura, superior a los 1.400 ℃, garantizan la oxidación de todos ellos, a excepción del monóxido de carbono.

La reducción del CO solo será posible en la medida que la temperatura de los gases descienda, circunstancia que acontece durante el enfriamiento, pero no en la cámara de combustión. La ecuación de equilibrio indica que, a alta temperatura, la reacción $CO + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO_2$, se desplaza hacia la izquierda.

Así pues queda asegurada, en la inmensa mayoría de los hornos, la presencia del CO. Como potente reductor este gas, que además es difusible, altera la gama de colores puesto que reduce la valencia de los metales cromóferos. En las estructuras de los silicatos fundidos la posición del hierro en sus diversas valencias ha sido muy estudiada. En el clásico ejemplo de la cocción de porcelana, o vajilla blanca, cuando las vagonetas pasan por la zona de 1.200 ℃ se genera algo de atmósfera reductora (CO) que obliga a las trazas de Fe_2O_3 (rojo) a pasar a FeO (blanco).

En los vidrios el óxido de hierro puede actuar como formador de vidrio, sobre todo en aquellos vidrios donde el óxido de hierro es muy abundante así como los metales alcalinos y alcalinotérreos. Pero también, como óxido ferroso, actúa como modificador de la red. La propia naturaleza muestra numerosos ejemplos de ello en la composición de las rocas ígneas.

El CO_2 y el CO ínter actúan sobre los metales del fundido. En la fabricación del vidrio se ha estudiado profusamente el efecto de la presencia de hidrógeno, vapor de agua y, naturalmente de oxígeno. Lo difícil es evaluar el efecto combinado del conjunto de ellos además de la basicidad, o acidez del propio fundido. No obstante por lo general es un factor de control complicado y sus consecuencias, con frecuencia son nefastas.

En el caso de emplear hornos de fusión eléctrica de capa fría no cabe hablar de la interacción de los compuestos volátiles procedentes de la combustión y sus secuelas. En el caso de la fusión eléctrica solo hay que constatar la incorporación de los «volátiles» a la red vítrea empezando por el flúor y el cloro.

3.1.4. Ventajas e inconvenientes de los diversos tipos de hornos de fusión

Al margen de las connotaciones ambientales que se analizarán con detalle en otros apartados, las principales ventajas e inconvenientes de la fusión eléctrica, en horno de «capa fría» se pueden resumir en:

- Ventajas:
  - Bajísimas emisiones.
  - Incremento del ratio de fusión por unidad de superficie del baño.
  - Mejora de la eficiencia energética.
  - Reducción en el coste de las materias primas por el hecho de poder usar residuos.
  - Mejor calidad del fundido y mayor homogeneidad.
  - Reducción del espacio y costes de inversión.
  - Explotación mas simple.
- Inconvenientes:
  - Costes de operación, en general, más elevados.
  - Mantenimiento más elevado (El baño trabaja a mayor temperatura que en otros sistemas y ello deteriora más rápidamente los refractarios).
  - Por el momento no es viable su construcción para hornos de altas producciones.

En general la fusión eléctrica produce un vidrio mucho más homogéneo y de mejor calidad, por lo que, al margen de las consideraciones en el coste del combustible, su empleo se ha ido imponiendo y sus aplicaciones ampliando.

Como se ha comentado anteriormente, con la excepción de hornos de grandes producciones para la fabricación de vidrio plano o soplado, hoy en día la fusión eléctrica esta extendida a diversos subsectores como:

- Fibras cerámicas, minerales y de vidrio.
- Vidrios especiales, con empleo masivo de metales pesados.
- Fritas cerámicas.
- Vitrificados con residuos.

3.2. LA LIXIVIACIÓN DE LOS PRODUCTOS VITRIFICADOS

Unas de las primeras dudas que asalta a los profesionales cuando se trata de valorizar residuos, en particular si son peligrosos es el interrogante que supone su estabilidad a largo plazo frente a la agresión de productos químicos, es decir el comportamiento a la lixiviación. El país europeo que más se ha enfrentado a este problema es, sin duda, los Países Bajos, donde la gran generación de residuos unido a la carencia de materiales de construcción convencional ha forzado a la valorización. Por lo general la fábrica que produce con residuos o los emplea parcialmente como materia prima tiene cierta ventaja económica frente a las que laboran con materias primas vírgenes, ello se explica por el hecho de que los residuos se pagan, mientras que las materias primas hay que comprarlas. Así pues desde el punto de vista económico, trabajar con residuos es ventajoso y ello despierta recelos en los fa-

bricantes convencionales que realizan campañas sobre el eventual peligro que puede entrañar un material producido a base de residuos con los años. Al final las autoridades neerlandesas optaron por una solución salomónica: todos los materiales de construcción, con independencia de su origen, deberían pasar un test de lixiviación. La sorpresa fue mayúscula ya que la mayoría de los materiales reciclados, o fabricados total o parcialmente con residuos, presentaban comportamientos a la lixiviación mejores que los vírgenes y ello tiene su lógica puesto que el profesional del reciclaje, consciente del problema al que se enfrenta, usa la mejor tecnología para evitar problemas.

Habida cuenta de la infinita cantidad de combinaciones susceptibles de ser vitrificadas y, como se ha visto, incluso dentro de una misma familia de vidrios la gama de vitrificados con propiedades diferentes es inmensa, sería erróneo o incorrecto hablar de comportamiento a la lixiviación de los vitrificados.

Las rocas ígneas naturales alcalinas, como los basaltos, proporcionan composiciones químicas parecidas a los vitrificados que se obtienen de fundir escorias de incineradoras de RSU. Las rocas naturales contienen en su composición muchos metales pesados y con frecuencia en cantidades muy superiores a los vitrificados convencionales obtenidos a partir de residuos. Así las rocas ultraferromagnésicas suelen contener más de 3.000 mg/kg de Cr. Los esquistos cuprosos, además del propio Cu, contienen hasta 900 mg/kg de As y muchas rocas sedimentarias tienen grandes cantidades de Pb y Cd (hasta 500 mg/kg). Lo cierto es que cuando se somete, en un ensayo comparativo, a examen la capacidad de lixiviación de una roca de estas con un vitrificado, éste siempre arroja valores muy por debajo que las materias primas naturales. La explicación estriba en el hecho de que los metales pesados no suelen estar insertados en una red como lo están en el caso de un vitrificado.

Otras características del vitrificado en comparación con una roca natural, como el granito, ponen de manifiesto que su mejor comportamiento a la lixiviación se debe, además de los motivos antes expuestos, a la absoluta falta de porosidad, lo que impide la penetración de los agentes agresores. La Tabla 7.12 muestra las propiedades de un granito en comparación con un vitrificado procedente del tratamiento de escorias de RSU. Es de resaltar que los vitrificados, al tener una porosidad nula son muy impermeables al ataque de los líquidos. Complementariamente la porosidad nula repercute en una resistencia al ciclo hielo/deshielo total, lo que favorece la aplicación de estos materiales para aquellas prestaciones en que sea necesario.

Tabla 7.12. Características físicas vitrificado Vs. granito

Característica	Vitrificado	Granito
Masa volumétrica seca	3.000 kg/m^3	2.500 kg/m^3
Porosidad	0%	2%
Absorción de agua	0%	>0%
Coeficiente Los Ángeles	30-35	30
Índice de heladicidad	0%	5%

La estructura que da lugar a tan excelentes propiedades es una fase vítrea mayoritaria que incorpora una serie de fases cristalinas como:

- Fases espinelas $MgAl_2O_4$, a veces sustituyendo el Mg por Zn, o el Al por Cr.
- Piroxenos, básicamente cálcicos.
- Silicoaluminatos complejos, como la gehlenita ($Ca_2Al_2SiO_7$) en los que, a veces, alguna parte de aluminio es sustituida por zinc.

El plomo, como otros metales fundentes, se encuentra mayoritariamente en la fase amorfa.

3.3. VITRIFICACIÓN SUPERFICIAL O TOTAL

La velocidad de enfriamiento de un vitrificado condiciona sus características fisicoquímicas. Cuando el vitrificado se enfría bruscamente sobre agua su estructura es absolutamente amorfa (frita) pero si el enfriamiento es lento, enfriamiento al aire, una parte importante del amorfo desvitrifica.

En el caso de las escorias metalúrgicas esta dualidad se pone de manifiesto en la forma de evacuación de las mismas. La Figura 7.21 muestra que la escoria, líquida flota sobre el baño. A medida que sale por la piquera se proyectan chorros de agua sobre la escoria incandescente (1, 2, 3, 4 y 5) que incide sobre un tambor rotativo.

El producto que se ha enfriado lentamente muestra todo él una estructura mezcla de vidrio y cristal. Se trata de un producto cristalizado, duro y poco reactivo. Se utiliza como árido, grog,...

El material que se ha enfriado más rápidamente presenta una estructura interna amorfa, mientras en la superficie se aprecia una recristalización notable. Se denomina producto granulado. Es un material amorfo con un estado energético superior y, por tanto, mucho más reaccionable.

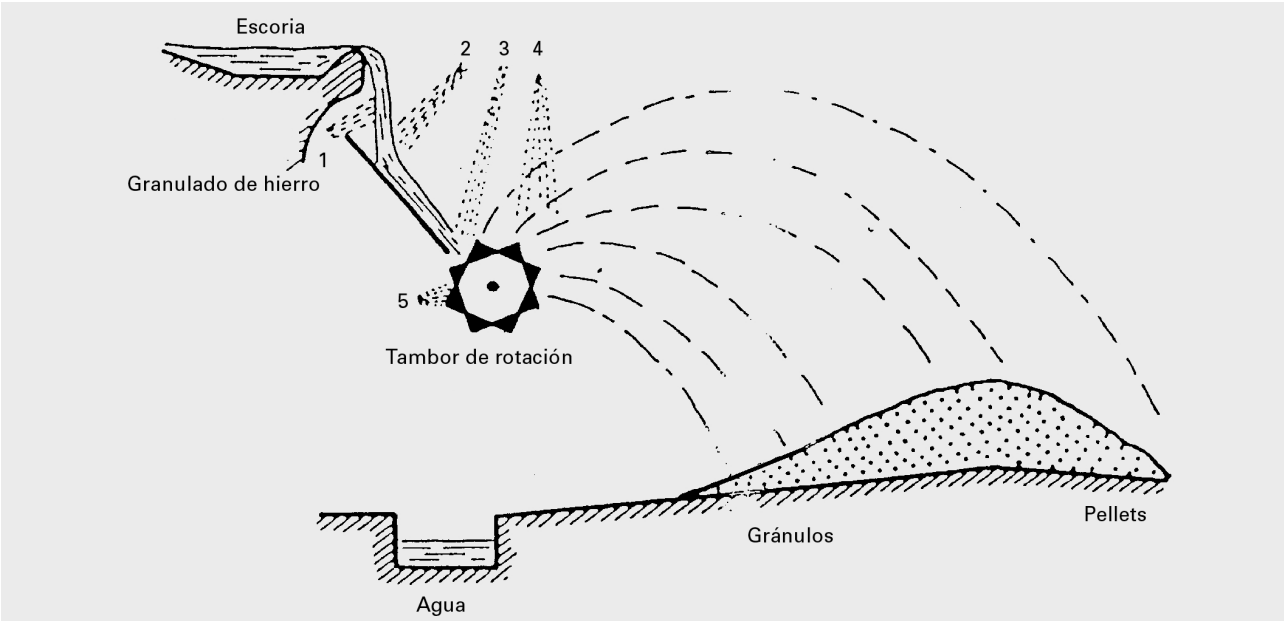


Figura 7.21. Proyección de escoria fundida sobre un tambor de enfriamiento.

3.4. LIMITACIONES DE LA VITRIFICACIÓN

La primera de ellas es obvia y tiene que ver con la estructura química. Efectivamente hay residuos, o materias primas naturales, que no son vitrificables debido a su composición química. Tal es el caso, por ejemplo, de los metales en general. Para que sean vitrificables deben pasar a un cierto nivel de oxidación. En el caso de escorias esto está asegurado puesto que la gran presencia de aire, en la mayor parte de los procesos térmicos, garantiza la oxidación de la mayoría de los metales presentes. Hay que tener en cuenta también que, a pesar de que muchos metales son inertes o semipreciosos, la presencia de oxígeno a alta temperatura supone una garantía de oxidación.

En términos generales, los compuestos de materia orgánica no resultarán nunca vitrificados ya que a cierta temperatura pirolizan, gasifican, y combustionan completamente, emitiéndose por la chimenea. Sin embargo, vale la pena hacer una anotación al respecto. En muchas matrices vitrificadas, por ejemplo las cenizas volantes de centrales termoeléctricas, se aprecia la presencia de cantidades notables de carbono. Ello tiene su origen en la materia combustible ligada al mineral de la roca madre. Durante la combustión, el oxígeno no tiene acceso a la materia orgánica y esta piroliza debido a la temperatura y deja un remanente (coque, char) en el interior del vitrificado. Esta particularidad ha sido empleada para destruir, en crisoles de fundición de metales, residuos con organoclorados. En el interior del baño no hay oxígeno pero sí una elevadísima temperatura que craquea y destruye el contaminante. Al quedar retenido el carbono y debido a que en la corriente de gases no existe oxígeno, es imposible la reformación de dioxinas y furanos.

En este sentido la citada tecnología del horno eléctrico de capa fría permite la vitrificación de la materia orgánica, se entiende por ello:

- Que la cantidad de materia orgánica no sea significativa: Tal sería el caso del carbón activo presente en los polvos de filtros de mangas de las incineradoras.
- De hecho no se trata de una vitrificación real sino de una microencapsulación en una matriz de vidrio de la materia orgánica.

La segunda limitación, en el caso de la vitrificación en hornos abiertos, hace referencia a ciertos contaminantes que acompañan a los materiales vitrificables. Tal es el caso, por ejemplo, de cloruros, sales de halógenos en general, y ciertos sulfatos. El caso de los cloruros es simple. A cierta temperatura, con frecuencia por debajo de los 600 ℃, los cloruros se descomponen y el ión cloro es emitido con los gases. En este caso debe preverse un lavador con productos básicos, sosa o lechada de cal, para precipitar una sal o bien directamente condensar el ácido clorhídrico.

Los sulfuros y algunos sulfatos también se descomponen y forman gases ácidos SO_2/SO_3 que será preciso neutralizar y recuperar antes de emitirlos a la atmósfera. El problema es solventable usando los hornos de capa fría.

El caso de los carbonatos es diferente. Todos ellos se descomponen a temperaturas por encima de 500 ℃ pero el producto gaseoso de la reacción, el CO_2, no es tóxico ni precisa de corrección alguna, al margen de fenómeno de arrastre ya mencionado.

Se puede concluir que la vitrificación es una tecnología que admite casi todos los materiales teniendo en cuenta que será preciso añadir, en el caso de emplear sistemas abiertos de vitrificación, lavado de gases cuando se hallen presentes contaminantes que den lugar a la formación de gases ácidos, o alcalinos.

3.4.1. La vitrificación y los halógenos

La finalidad del grupo de sustancias modificadoras del retículo es favorecer la formación de vidrio, rebajando su temperatura de fusión. Los óxidos que así actúan son los denominados modificadores de red o, simplemente, fundentes.

La presencia de fundentes es necesaria e imprescindible y, al margen de los problemas que puede ocasionar en la calidad del propio vidrio, es importante resaltar su efecto en el campo ambiental. Los fluoruros, por ejemplo constituyen un buen ejemplo de ello.

Los fluoruros, además de ejercer una acción opacificadora, son fluidificantes al hacer disminuir notablemente la viscosidad del vidrio. Este efecto se debe a que los iones fluoruro, por tener un radio iónico muy parecido al del oxígeno, sustituyen parcialmente a éste en el retículo vítreo y, al no disponer más que de una carga negativa, interrumpen la continuidad reticular, creando puntos de rotura.

El empleo de sustancias fluoradas presenta el grave inconveniente de su elevada volatilidad, que se traduce en una fuerte corrosión de los materiales refractarios y un peligroso agente contaminante para el medio ambiente.

El uso de fundentes fluorados con respecto al problema de las emisiones, como la criolita (Na_3AlF_6) o el espato flúor (CaF_2), ambos muy abundantes en la naturaleza, no radica en el contenido de flúor en sí, sino en la forma de fusión.

Otra ventaja adicional de los fluoruros, en combinación con el sodio es la formación de eutécticos de bajo punto de fusión. Así a 660 ℃ se forma el eutéctico $NaF\text{-}Na_2CO_3$. Todo ello, como es obvio acelera la reacción con la sílice y adelanta la formación de vidrio. A temperaturas elevadas los iones fluoruro reaccionan con la sílice formando SiF_4, muy volátil (de ahí la importancia de trabajar con fusión eléctrica), a la vez que el óxido de cal se incorpora al vidrio, según:

$$2\ CaF_2 + SiO_2 \rightarrow SiF_4 + CaO$$

Otro tanto podría decirse de ciertos compuestos de cloro. En resumen, la forma de llevar a cabo la fusión, o de evitar el escape de halógenos, además de mejorar el ambiente abre nuevas posibilidades de usar fundentes a partir de estos elementos.

4. Vitrificación con residuos

A medida que crece la presión ambiental y aumentan los precios de los vertederos, la vitrificación despunta como una tecnología que permite tratar de forma ambientalmente correcta los residuos peligrosos de manera segura lo que se traduce en una posibilidad, mas allá de inertizar, de valorizar. En este apartado se comentan unas cuantas aplicaciones a familias de residuos bien significados.

4.1. PRODUCCIÓN DE VITRIFICADO VALORIZABLE A PARTIR DE RESIDUOS DE AMIANTO

Con el nombre de amianto se conocen una serie de compuestos procedentes de silicatos naturales fibrosos. De hecho se conocen como unas seis variedades que, mineralógicamente pertenecen a dos especies de silicatos diferentes: las serpentinas (crisotilo o amianto blanco) y los anfíboles (amosita o amianto gris, anfofilita, crocidolita o amianto azul y la tremolita). En la práctica el crisotilo, la amosita y la crocidolita suponen el 95% de las aplicaciones industriales.

El amianto posee una serie de propiedades que lo ha hecho muy estimable desde la antigüedad. La más destacable es la resistencia al fuego, la tenacidad frente a las agresiones químicas y, sobre todo, la resistencia mecánica que ha permitido trabajarlo como si de una fibra textil se tratara.

La fusión directa del amianto es difícil, aunque la temperatura de descomposición del silicato sea baja,

puesto que el análisis químico denota que su composición no es la adecuada para ser fundida por sí sola. Por tanto, lo más correcto es añadir algún mineral que proporcione un punto de fusión más asequible. No obstante, hay hornos que funden el residuo de amianto únicamente pero precisan una temperatura muy elevada, del orden de 1.600 ℃ que, con frecuencia es proporcionada por una antorcha de plasma. Semejantes temperaturas provocan la volatilización de parte del líquido además de las fibras que son arrastradas por la corriente de gases. Por todo ello, la planta debe incluir una estación de tratamiento y lavado de gases.

Con todo el vitrificado obtenido por el sistema descrito es de excelente calidad. Se trata de un sólido negro, compacto con una densidad de 3.600 kg/m^3. El análisis químico del vitrificado es concordante con el residuo ingresado en el horno, mientras que el mineralógico demuestra que la fase principal es la amorfa con ciertas recristalizaciones de magnetita, olivino, etc.

Desde el punto de vista de la formulación del vitrificado, es más lógico usar el amianto como una materia prima ya que aporta básicamente MgO y SiO_2 y a ello habrá que añadir otros aditivos hasta lograr una temperatura de trabajo razonablemente baja.

En cuanto a la lixiviación hay que decir que una vez vitrificado el material no es amianto y, por tanto, no tiene toxicidad alguna (como ya se ha comentado, una vez el amianto deja de ser mineral: fibra, ya no es peligroso). Sin embargo como su valorización consistirá en su utilización como grava para bases y subbases se le deberá someter a un test de lixiviación que permita extrapolar su comportamiento a largo plazo simulando unas condiciones similares a las que deberá soportar en servicio. El test en cuestión es el TCLP (*Toxicity Characteristics Leaching Procedure*). La Tabla 7.13 expone los resultados comparativos entre los productos entrantes y los lixiviados de acuerdo con el ensayo de lixiviación estándar y el test TCLP.

Tabla 7.13. Lixiviación de vitrificados de amianto

Elementos	Productos en la fusión	Test estándar lixiviación (mg/kg)	Test TLCP pH 2,0 (mg/kg)
SiO_2 %	28,7	222,13	90
Al_2O_3 %	9,6	30,2	131,3
Fe_2O_3 %	32,6	30,24	227,2
CaO %	11,5	265,9	450
MgO %	2,0	15,7	1,2
K_2O %	0,04	21,1	—
MnO %	0,34	0,7	—
Cr (total) g/t	1.153,4	0	<0,6
Ni g/t	144,6	<0,04	0,32
Cu g/t	403,4	<0,13	1,66
Zn g/t	896,6	<0,44	27,6
As g/t	14,7	0,00	<0,6
Cd g/t	4,1	<0,0	0,34
Pb g/t	205	<0,25	5,4

4.2. UTILIZACIÓN DE LAS ARENAS DE FUNDICIÓN EN LA VITRIFICACIÓN

Las arenas de fundición constituyen el residuo más importante de las fundiciones convencionales. La arena se aglomera y compacta con la ayuda de aglomerantes orgánicos (resinas alquídeas, fenólicas o furánicas) o arcillas bentoníticas. De esta manera permite ser conformada para recibir el metal fundido. Una vez desmoldeado y frío hay que destruir el molde. La temperatura, los aglomerantes y la naturaleza de ciertos metales conducen a una inclusión de los mismos en la parte superficial de la arena que conforma el molde. Así pues el molde deviene un residuo, más o menos conflictivo en función del proceso que ha sufrido.

Se han desarrollado numerosos procesos para la recuperación de las arenas en las propias fundiciones, como el que aparece en la Figura 7.22. El tratamiento consiste en un calentamiento indirecto de las arenas hasta los 1.000 ℃, aspirando los humos para conducirlos a una cámara de postcombustión. El principio se basa en un tratamiento térmico adecuado que provoca la descomposición de las resinas aditivadas. Pero la reutilización para el mismo uso tiene un límite.

Un sistema convencional de valorización de las arenas de fundición consiste en su adición a las materias primas para la formación del clínquer.

La arena es esencialmente cuarzo, el formador de vidrio por excelencia. De ahí la aplicación de las arenas de fundición como materia prima para las vitrificaciones.

4.3. VITRIFICACIÓN DE CENIZAS VOLANTES

El término ceniza volante hace referencia a aquellas partículas que son arrastradas por los gases y se recogen finalmente en los sistemas de depuración de gases. No obstante, esta definición no hace mención a la caracterización de la naturaleza química y mineralógica de los elementos que la componen, por ello

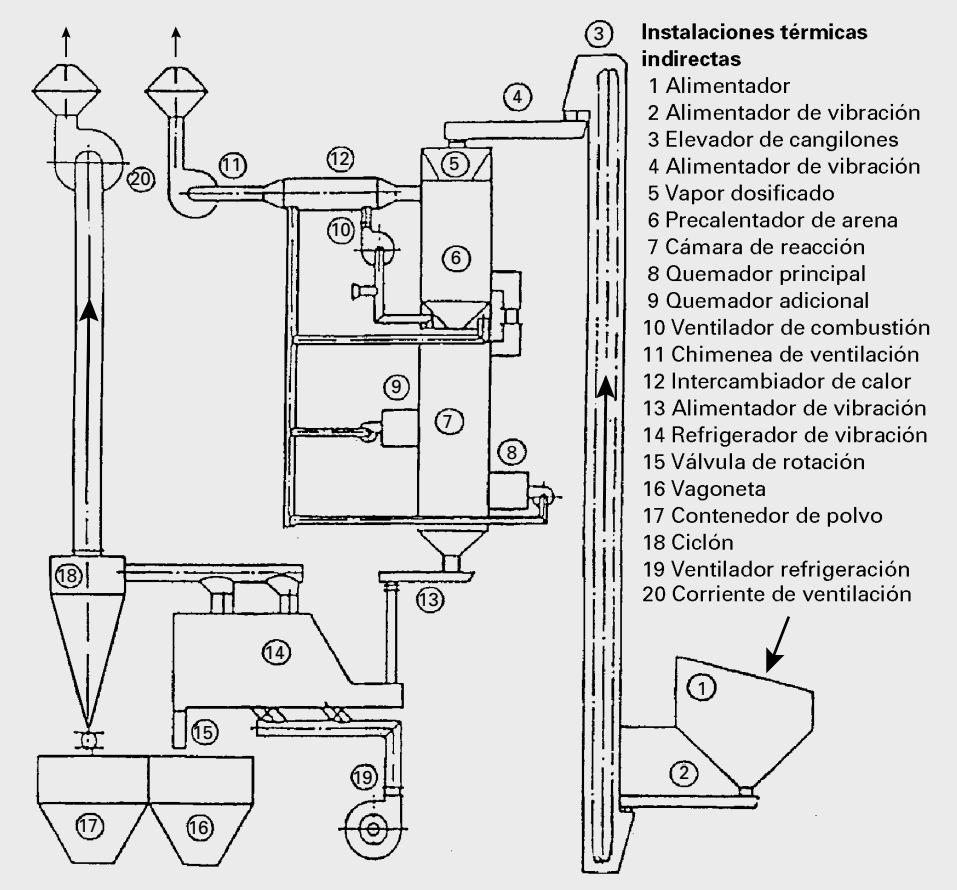


Figura 7.22. Instalación de recuperación de arenas de fundición.

es preciso referirse a cenizas indicando, en cada caso, su procedencia como se hace en capítulos siguientes.

4.3.1. Vitrificación de cenizas volantes de incineradoras de RSU

Las cenizas volantes de las plantas incineradoras de RSU son residuos especiales ya que se recogen en el electrofiltro o en el filtro de mangas del sistema de tratamiento de gases y junto a ellas aparecen casi todos los metales pesados arrastrados por los gases durante la incineración de RSU. Además contienen sales solubles lo que acaba de complicar la situación frente a la lixiviación que sufrirá en el vertedero. Es por ello que algunos países ya han prohibido su vertido en cualquier tipo de vertedero y obligan a su vitrificación.

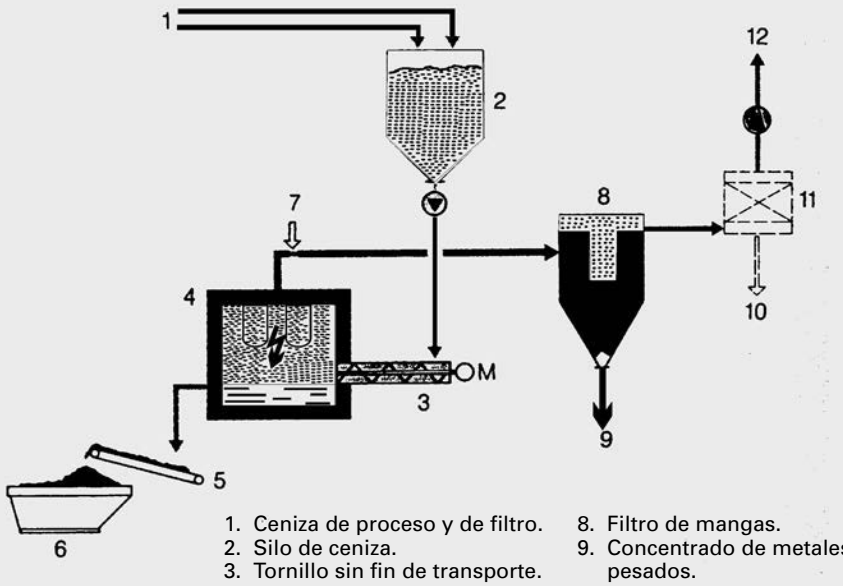
Las plantas incineradoras producen una gran cantidad de cenizas. Pese a que su porcentaje no suele superar el 3% respecto a la masa del material entrante, la gran cantidad de RSU tratado supone una ingente generación de cenizas.

La ceniza volante tiene una composición rica en metales, sales solubles y fundentes, pero es pobre en sílice (formador de vidrio) y alúmina. Por ello, para su vitrificación es preciso añadir compuestos correctores y ajustar la temperatura de acuerdo con la formulación.

La Figura 7.23 muestra un esquema de vitrificación de cenizas volantes de RSU. Los sistemas de fusión y formación de vidrio a alta temperatura comportan serios problemas secundarios por cuanto se facilita la volatilidad de los metales pesados antes de que se inicie una fase amorfa de relativa baja viscosidad capaz de atrapar a los óxidos de los metales más volátiles.

Para llevar a cabo una correcta preparación de las cenizas, antes de su fusión hay que lavarlas para eliminar las sales solubles. Estas, si son cloruros se evaporan en el horno y es preciso tratar los gases con lo que resulta mucho más eficaz tratar las cenizas volantes antes de su introducción en el horno.

De acuerdo con la Tabla 7.23, la composición mayoritaria responde a la fórmula de un vidriado tradicional (si bien con poco SiO_2 y mucho Al_2O_3),



1. Ceniza de proceso y de filtro.
2. Silo de ceniza.
3. Tornillo sin fin de transporte.
4. Horno de fusión.
5. Transportados de tablillas.
6. Vidrio.
7. Aire de enfriamiento por inyección.
8. Filtro de mangas.
9. Concentrado de metales pesados.
10. Concentrado de mercurio.
11. Adsorbedor (facultativo).
12. Realimentación al horno de incineración o a la instalación de purificación de gas.

Figura 7.23. Proceso de vitrificación de cenizas volantes de incineradoras de RSU.

con la excepción de la gran cantidad de CaO. Ello indica que estos polvos se hallan dentro de una zona de vitrificación.

El residuo vitrifica bien cuando se le añade ciertas cantidades adicionales de PbO, ZnO o, incluso, fosfato de calcio. El rango de fusión, para el polvo sin aditivos, oscila entre 1.450 y 1.500 ℃. Los vitrificados obtenidos sin ninguna clase de aditivación presentan inclusiones de metales, en particular cobre. Ello es debido a la presencia de carbono que reduce algunos óxidos a metal, o bien mantiene la forma metálica en algunos de ellos. El problema de la presencia de metal en el vitrificado es que presenta tendencia a incrementar la capacidad de lixiviación.

El modelo básico de vidrio para este tipo de polvos tiene la siguiente composición:

- Na_2O 10%
- CaO 30%
- MgO 5%
- Al_2O_3 15%
- SiO_2 40%

4.3.2. Vitrificación de cenizas volantes de centrales termoeléctricas

Estas cenizas volantes son residuos de las centrales termoeléctricas que consumen carbón. La combustión de un combustible sólido es siempre muy conflictiva desde la óptica del medio ambiente. Los excesos de aire necesarios condicionan un arrastre importante de partículas que deben ser recuperadas en los filtros de mangas.

Por regla general cuando una operación es complicada desde el punto de vista del medio ambiente, también reporta problemas en los rendimientos térmicos. Así, la simple observación de la tabla de análisis químico de las cenizas volantes denota una presencia importante de carbón, lo que demuestra que una parte del combustible inicial no se ha transformado. O lo que es lo mismo: el rendimiento térmico no es el óptimo debido a la presencia de inquemados en los efluentes.

A las temperaturas de las cámaras de combustión, siempre superiores a los 1.300 ℃, los elementos que son arrastrados funden pero su inmersión en la corriente de gases provoca un brusco enfriamiento que transforma el fundido en un material de naturaleza esencialmente vítrea.

La Tabla 7.14 muestra el análisis mineralógico de las cenizas volantes. El vidrio es la fase mayoritaria en la mayoría de ellas, en particular en las partículas de granulometría más fina.

Sin embargo los análisis químicos denotan que el contenido de Al_2O_3 en relación al SiO_2 es muy alto, lo cual supone un punto de fusión muy elevado. Esto

Tabla 7.14. Mineralogía de las cenizas volantes de centrales termoeléctricas

Componente mineralógico	Porcentaje en masa del componente mineralógico	
	Ceniza fina	Ceniza gruesa
Vidrio	79	58
Magnetita y hematites	6	16
Carbón	4	13
Material anisótropo	6	4
Agregados	5	9

es un claro inconveniente de cara a las aplicaciones de vitrificación. Sin embargo, un hecho positivo lo constituye el que la fase mayoritaria sea la vítrea. La Tabla 7.15 muestra los límites normales de composición de las cenizas volantes españolas.

Cualquier proceso de vitrificación se ve favorecido por la adición de un vidrio, por tanto, desde el punto de vista de la reutilización como de introducción de fundentes para ayudar a vitrificar otros residuos, las cenizas volantes son, por si solas vidrios con una formulación descompensada pero con un potencial de uso inmenso si se ajusta la formulación.

Tabla 7.15. Análisis químico de las cenizas volantes de centrales termoeléctricas

Óxido	Valores mínimos %	Valores máximos %
SiO_2	32	64
Al_2O_3	21	35
Fe_2O_3	5	26
CaO	1	12
MgO	0,5	3
SO_3	0,2	2,6
Na_2O	0,03	0,7
K_2O	0,4	4
P.F.	0,5	10

4.4. VITRIFICACIÓN DE POLVOS DE FILTROS

En la medida que los límites de emisión de gases a la atmósfera son más estrictas es preciso la instalación de ciclones, filtros electrostáticos o de mangas para retener el material particulado arrastrado por la corriente de gases.

La tipología de este material particulado es tan extensa como industrias existen y su naturaleza se complica en función de la posibilidad de incorporar subproductos en la formulación de las materias primas. En cualquier caso el resultado es que la cantidad de polvos de filtros es cada vez más elevada y deben buscarse soluciones para su reutilización. La vitrificación es una buena herramienta puesto que la naturaleza física de los polvos, casi con independencia de su caracterización, hace inviable su uso directo.

La Tabla 7.16 reproduce el análisis medio de polvos de incineradora, expresados en forma de óxidos. La composición mayoritaria responde a la formula de un vidriado tradicional, con la excepción de la gran cantidad de CaO. Ello indica que estos polvos se hallan dentro de una zona de vitrificación.

El residuo vitrifica bien cuando se le añade ciertas cantidades adicionales de PbO, ZnO o, incluso, fosfato de calcio. El rango de fusión, para el polvo sin aditivos, oscila entre 1.450 y 1.500 ℃.

Tabla 7.16. Análisis medio de polvos de incineradora

Compuesto	% en peso	Compuesto	mg/kg
SiO_2	31,4	Cd	134
Al_2O_3	16,3	Cr	447
Fe_2O_3	2,7	Cu	667
TiO_2	1,9	Ni	35
CaO	19,3	V	131
MgO	2,7	Pb	3.213
Na_2O	3,4	Zn	10.386
K_2O	4,6	Ag	14
P_2O_5	1,6	Sb	227
ZrO_2	< 0,05	Se	7
BaO	0,3	Sn	1.102
SrO	0,04	Hg	17
Mn_3O_4	0,16	Co	23
SO_3	2,9		
Cl	4,4	C total	7,6 %
F	0,15	C libre	6,5 %

4.5. REUTILIZACIÓN DE VIDRIOS ESPECIALES POR VITRIFICACIÓN

Los vidrios de los RAEE (Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos), representa casi el 80%, en términos de masa, por lo que hace referencia a televisores y ordenadores, teniendo en cuenta que la cantidad total de RAEE, en 2004, se cifraba en 4 kg/persona y año, y de ellos solo se recuperaba el 11%, vale la pena explorar las posibilidades de valorización. La Figura 7.24 muestra un almacenamiento de tubos catódicos.

Figura 7.24. Residuos de vidrios de tubos catódicos.

Los vidrios procedentes de tubos catódicos son, en realidad de tres tipos diferentes: la parte frontal, el cono y la embocadura (o cuello). El vidrio que compone la parte frontal de la pantalla es muy rico en bario y estroncio, mientras el que forma el cono lo es en plomo. Una vez extraidos de los polvos fluorescentes que llevan adheridos en la parte interna, se pueden usar en cerámica o simplemente como una materia prima más para la fabricación de vidrios o fritas. La Tabla 7.17 muestra la caracterización de este tipo de vidrios de TV y PC procedentes de pantallas de color y de blanco y negro.

Como muestra la tabla, las composiciones son perfectamente compatibles con aplicaciones para cerámica y vidrio. Las temperaturas de reblandecimiento son de 855 ℃ para el vidrio de color, y de 750 ℃ para el del cono. Sin embargo la mezcla de ambos vidrios presenta una temperatura de reblandecimiento inferior, de 720 ℃. La densidad real es del orden de 2.900 kg/m^3.

Para su reciclaje y recuperación es preciso seguir las siguientes pautas:

- Clasificar escrupulosamente las diversas clases de vidrios. Para determinadas aplicaciones, como carga para composiciones de pasta de porcelana, no es preciso clasificar mucho.
- Separar el polvo fluorescente del que se hallan pintados estos vidrios.
- Separar todos los elementos que no sean vidrios. Sobre todo, la embocadura que contiene la parte metálica correspondiente al cañón de electrones.
- Aplicar a los cascotes una trituración adecuada de acuerdo con el uso posterior.

Tabla 7.17. Análisis químicos, en % de peso, de vidrios de RAEE

Óxido	Frontal color	Cono color	Frontal blanco y negro	Cono blanco y negro
SiO_2	61,23	56,72	66,05	65,49
Al_2O_3	2,56	3,42	4,36	4,38
Na_2O	8,27	6,99	7,63	7,05
K_2O	5,56	5,37	6,65	5,72
CaO	1,13	3,12	0,00	0,00
MgO	8,76	2,02	0,01	0,00
BaO	10,03	4,03	11,38	11,20
SrO	8,84	1,99	0,99	0,94
Fe_2O_3	0,10	0,11	0,25	0,14
Sb_2O_3	—	—	0,44	0,44
CoO	0,02	0,00	0,01	0,01
TiO_2	0,35	0,19	0,13	0,03
ZrO_2	0,91	0,24	0,07	0,01
ZnO	0,18	0,22	0,00	0,00
PbO	0,02	15,58	0,03	0,00
NiO	0,03	0,02	0,04	0,03
P_2O_5	0,00	0,00	0,00	0,00
Otros	—	—	1,96	3,56

Una vez se cumplen estos extremos, es posible producir diversos materiales nuevos, como los diferentes tipos de fibra que aparecen en la Figura 7.25, con un diámetro entre 10 y 12 μm.

Con estas fibras se fabrican unas mantas y/o paneles que presentan una notable propiedad de absorción de las radiaciones. De hecho ello no es de extrañar ya que el vidrio del cual procedían contenía una composición en metales: Ba, Sr y Pb especialmente diseñada para la absorción de radiaciones.

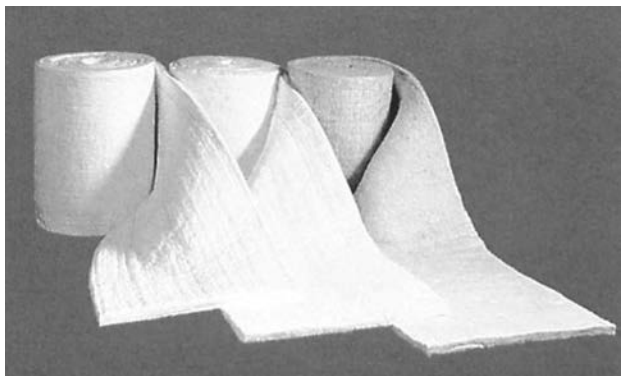


Figura 7.25. Paneles de fibra.

Cuando, por alguna causa el baño de material virgen, de los que contienen Pb, se echa a perder, experimentalmente se ha constatado que es muy complicado de transformarlo en fibra. Sin embargo, es relativamente fácil mezclarlo con otros residuos afines, como el polvo de filtro. Así, una vez mezclado y homogeneizado, se puede fibrar de nuevo.

El vitrificado procedente de este tipo de vidrios especiales tiene un intenso color oscuro. Ello presenta la ventaja de absorción de calor si su uso se destina a la fabricación de placas para colectores solares.

4.6. POSIBILIDADES DE VALORIZACIÓN DE DIVERSOS RESIDUOS DE LA INDUSTRIA METALÚRGICA A PARTIR DE LA VITRIFICACIÓN

En primer lugar es preciso hacer una distinción entre escoria (generalmente una estructura vitrificada) y chatarra (mezcla de metales).

Una escoria es una mezcla de óxidos metálicos (SiO_2, CaO, MgO, Al_2O_3, FeO, Fe_2O_3, Na_2O, K_2O) más o menos bien fundidos con pequeñas proporciones de alguno de los siguientes compuestos: sulfuros, fluoruros, fosfatos, carburos, boratos o nitruros.

La escoria se produce como consecuencia de un proceso primario de recuperación de un determinado metal. Una mata es una mezcla de sulfuros de metales pesados fundidos (Fe, Cu, Ni) que contiene disuelta algunas cantidades de óxidos.

La capacidad de formar más o menos escoria en un proceso depende de los óxidos presentes. Así el SiO_2 es un buen escorificante de la cal. El diagrama binario SiO_2-CaO presenta una serie de eutécticos a baja temperatura. Como que el componente principal de las escorias es el SiO_2 se puede establecer un paralelismo entre los vidrios y las escorias. La Tabla 7.18 muestra, en porcentaje de peso, la caracterización típica de varias escorias metalúrgicas.

El carácter ácido de la escoria viene determinado por la presencia de SiO_2 u otros formadores de vidrio, mientras que las escorias básicas o alcalinas están caracterizadas por la mayor abundancia de óxidos de metales alcalinos y alcalinotérreos.

La mayoría de los residuos de la industria siderúrgica y metalúrgica se caracterizan por albergar una cantidad importante de metales de notable valor como Cr, Ni, Cu, Zn, Pb, etc. El problema estriba en que los sistemas de recuperación actuales suponen unos costes mayores que la adquisición de las materias vírgenes. En esta tesitura la vitrificación se presenta como una opción intermedia que permite valorizar dichos residuos e impedir que vayan a parar al vertedero.

Tabla 7.18. Caracterización de escorias siderúrgicas y metalúrgicas

Óxido	E. de alto horno	E. de LD	E. horno eléctrico
SiO_2	35	15	22
CaO	40	50	22
Al_2O_3	12	0,7	—
FeO	0,5	18	38
Fe_2O_3	—	4	5
MgO	10	6	9
MnO	2,5	5	2
P_2O_5	—	1,3	2

La Figura 7.26 y la Figura 7.27 exponen las cantidades de metales presentes en los tres tipos de residuos más frecuentes resultantes de los procesos de tratamientos metalúrgicos.

Los polvos de acería en el País Vasco, la región española con mayor producción de acero en horno eléctrico, se someten a una inertización con cemento portland y lechada de cal y se depositan en un mono vertedero. Es una solución temporal hasta desarrollar un sistema que permita una valorización económicamente viable. Se ha ensayado el calentamiento de los polvos mezclados con coque. La idea es que el coque reduzca los óxidos y más tarde, usando métodos pirometalúrgicos, se puedan separar los metales.

Los polvos de acería son relativamente fáciles de vitrificar si se diseña una composición que permita la completa integración de los óxidos más volátiles: CdO, PbO y ZnO. El vidrio obtenido es de color muy oscuro, casi negro, debido a la gran presencia de cationes cromóferos. La salida de estos vitrificados es su valorización como árido para integrarse en hormigón, a granel o al asfalto.

El sistema Waelz consiste en el calentamiento de los polvos de acería en un horno rotativo hasta conseguir la volatilización de los óxidos más valiosos, el Pb y el Zn. En su versión actual, es un sistema fuertemente contestado por los grupos ecologistas debido al impacto ambiental que presenta.

La escoria tiene una valorización mucho más fácil, puesto que tiene una matriz parcialmente vítrea que facilita las aplicaciones inmediatas como árido a granel. A la vez, esta estructura amorfa la hace apta para incluirla en formulaciones de vitrificados.

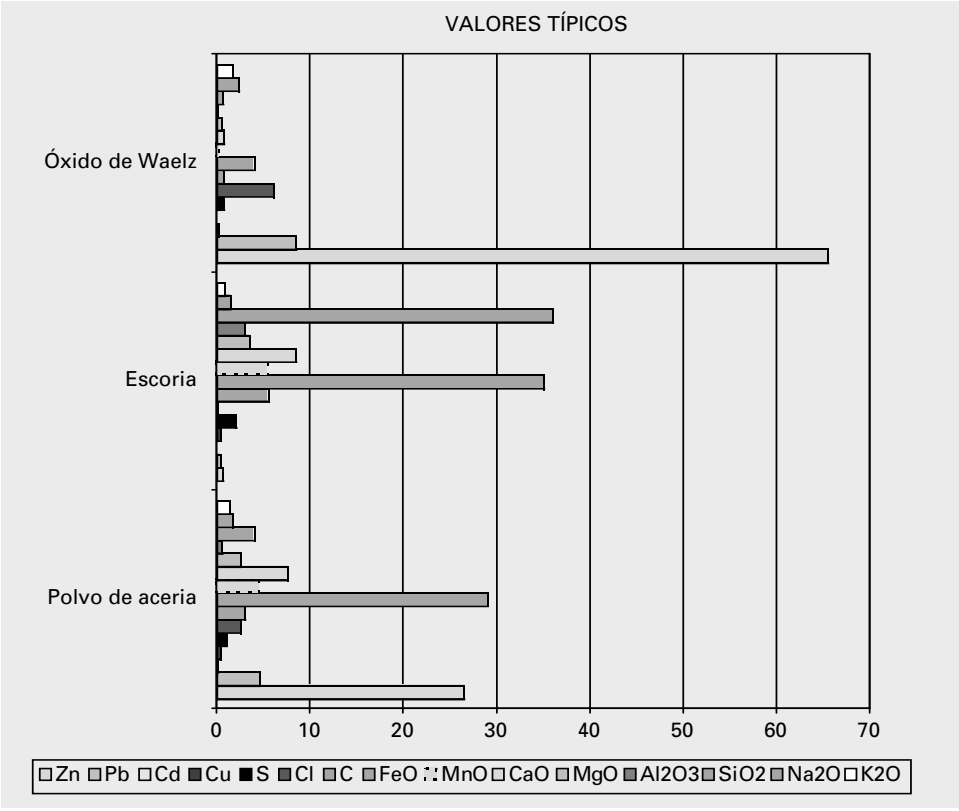


Figura 7.26. Presencia de metales pesados en residuos metalúrgicos.

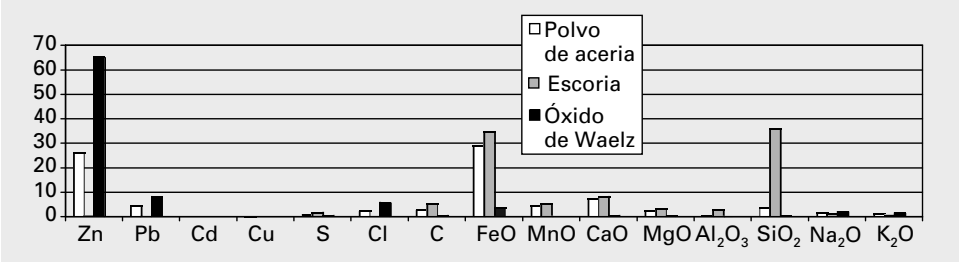


Figura 7.27. Metales presentes en diversos residuos.

4.6.1. Generación y aprovechamiento de escorias siderúrgicas

Las escorias siderúrgicas, como otros muchos tipos de residuos de esta naturaleza, se generan a alta temperatura y quedan flotando en la superficie del baño hasta que son evacuadas. Esto supone que, en función de la velocidad de enfriamiento, contengan una cantidad más o menos importante de fase vítrea. Precisamente esta naturaleza es la que confiere a este tipo de residuos sus características especiales: gran dureza y elevada resistencia a la lixiviación.

Sobre el diagrama ternario SiO_2-Al_2O_3-CaO de la Figura 7.28 se han representado una serie de residuos y materiales naturales de estructura mayoritariamente vítrea.

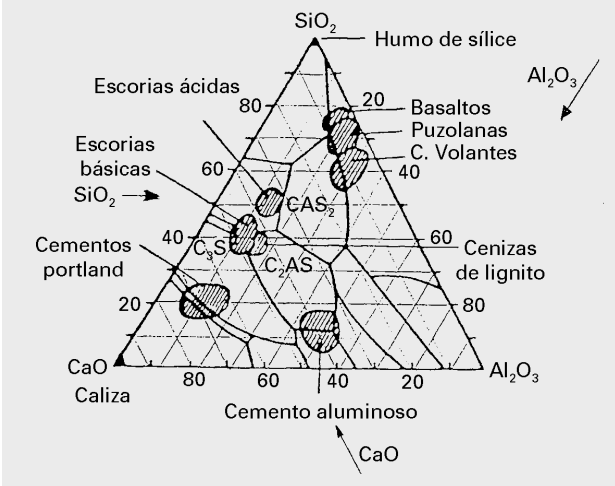


Figura 7.28. Situación de diversos residuos en el diagrama ternario: SiO_2-Al_2O_3-CaO.

Con un porcentaje mínimo de Al_2O_3, lo que supone puntos de fusión razonablemente bajos, aparecen las cenizas volantes, las puzolanas naturales y los basaltos. Estos últimos son rocas de grano fino aglomerado con vidrio. Al igual que la puzolana natural son rocas de origen volcánico. El basalto fundido junto a otros constituyentes es la materia prima básica para la fabricación de aislantes a base de fibra mineral.

A medida que aumenta el tenor de alúmina el punto de fusión se incrementa. Este factor no es favorable para la aplicación industrial y entonces se recurre a añadir fundentes para reducir la temperatura de trabajo.

La Figura 7.29 muestra la generación de escoria en un alto horno y su forma de evacuación. Observando el sinóptico se comprende que el sistema de enfriamiento de las escorias determina su microestructura y, sobre todo su tamaño, lo que a su vez condiciona las aplicaciones a que se pueda destinar.

El enfriamiento al aire (enfriamiento lento) genera la escoria cristalizada y el enfriamiento rápido, al agua, produce la escoria granulada. Las principales aplicaciones de cada uno de los tipos son:

ESCORIA CRISTALIZADA

- Balasto para ferrocarril.
- Bases para carreteras.
- Agregados para hormigones.
- Materia prima para fabricación de clínquer.
- Lana mineral.

ESCORIA GRANULADA

- Aditivo para el hormigón.
- Morteros.
- Hormigones porosos y ligeros.
- Finos para agregar al hormigón y asfalto.
- Materia prima para cerámica.

Las escorias siderúrgicas son residuos que se generan en grandes cantidades. Por término medio la producción de 1 t de acero supone la generación de 0,2-0,3 t de escoria. Es normal que dada la gran cantidad de material y aceptada su relativa afección al medio, se hayan buscado numerosas formas de reutilización, en particular en la obra pública ya que ésta presenta un potencial de consumo muy importante.

Por estas mismas razones no es de extrañar que las regiones con gran tradición en la fabricación de acero, sean las pioneras en la reutilización de este tipo de residuo. En España hay que destacar el caso del País Vasco.

4.6.2. Polvos de acería. Generación y caracterización

Los polvos de acería son residuos generados por la industria metalúrgica transformadora que trabaja con arco eléctrico a partir de chatarra de acero. Esta, obviamente tiene un sinfín de procedencias y, en consecuencia, su composición es variada, lo que repercute en la futura composición de los polvos de acería. En el Capítulo 14 de esta obra se amplía la caracterización y problemática de estos residuos.

A la temperatura del horno, siempre superior a los 1.500 ℃, muchos metales y óxidos se volatilizan y deben ser recuperados a través del sistema de captación de polvo de la planta. La composición química media de los polvos de acería se reproduce en la Tabla 7.19.

La chatarra se introduce en el horno de fusión que produce una gran cantidad de gases. Estos son captados por el sistema de aspiración de polvo y los

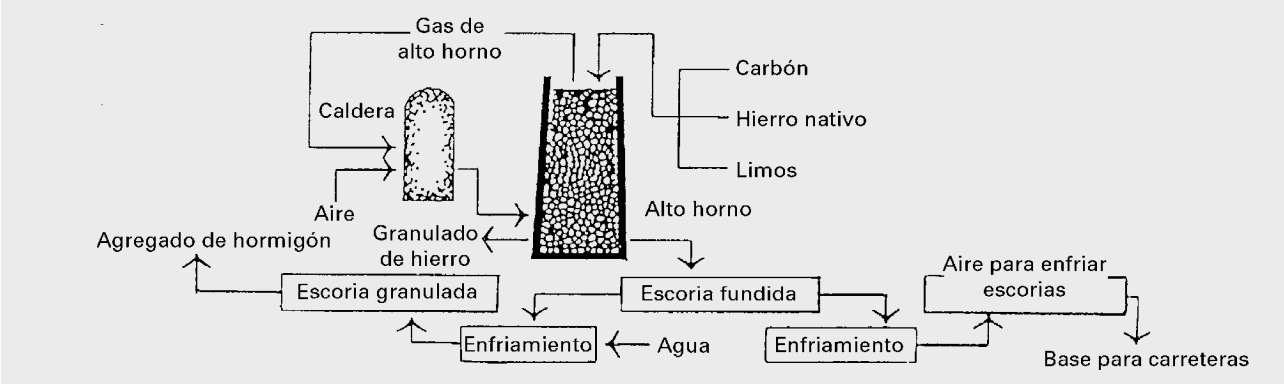


Figura 7.29. Enfriamiento de la escoria de un alto horno.

Tabla 7.19. Composición química de diferentes polvos de acería.

Composición	PC	PE	Composición	PC	PE	Composición	PC	PE
Zn	24,4	12,9	Fetotal	28,9	32,3	SiO_2	1,6	1,2
Pb	6,2	3,2	Mn	4,0	3,7	Al_2O_3	0,6	0,7
Cd	0,07	0,03	Cu	0,5	0,1	CaO	4,0	4,9
Cr	0,3	0,35	Sn	0,08	0,12	MgO	1,1	0,3
Ni	0,06	0,05	K	2,0	0,8	Cl	4,6	1,6

conduce hasta el filtro de mangas donde son retenidos y almacenados.

Los polvos de acería, a diferencia de las escorias, no tienen ninguna fase vítrea. Como muestra el análisis de la Tabla 7.19, tanto los polvos generados en la fabricación de aceros especiales (PE), como los aceros comunes (PC), están formados por un conjunto de óxidos y metales sin ningún tipo de cohesión entre ellos. De aquí la gran facilidad de lixiviar bajo cualquier condición favorable del entorno exterior y su peligrosidad ambiental. Los polvos de acería no pueden vitrificar por si solos pero no es difícil de vitrificarlos e inertizarlos.

De los óxidos presentes en estos polvos, los que tienen mayor interés económico son los de Zn y Pb que, afortunadamente, coinciden con los puntos de vaporización reducidos de dichos metales. Para ello el sistema consiste en adicionar coque en la mezcla e introducir la carga en un horno rotativo, como el que muestra la Figura 7.30.

El agente reductor (coque) reduce el oxido a metal y la elevada temperatura del horno vaporiza el metal. Posteriormente, como indica el esquema, los metales son recogidos por un filtro de mangas. El material recuperado, denominado «óxido de Waëlz», tiene una composición media de Zn: 54-56%, Pb: 9-11% y cantidades inferiores al 1% de toda una serie de metales.

El proceso Waëlz descrito está contestado por ciertos grupos conservacionistas que aducen que se trata de un proceso poco ecológico. El debate arranca de que el balance de entrada: polvo de acería, más coque, más aire es desproporcionado con referencia a la salida valorizable: óxidos de zinc y plomo, puesto que, hoy en día el resto del material va a parar al vertedero y las emisiones precisan de un gran equipo de depuración de gases.

4.6.3. Chatarras y polvos de Zinc

La chatarra, residuo por excelencia, representa una fuente de materia prima para la producción de acero de valor incalculable.

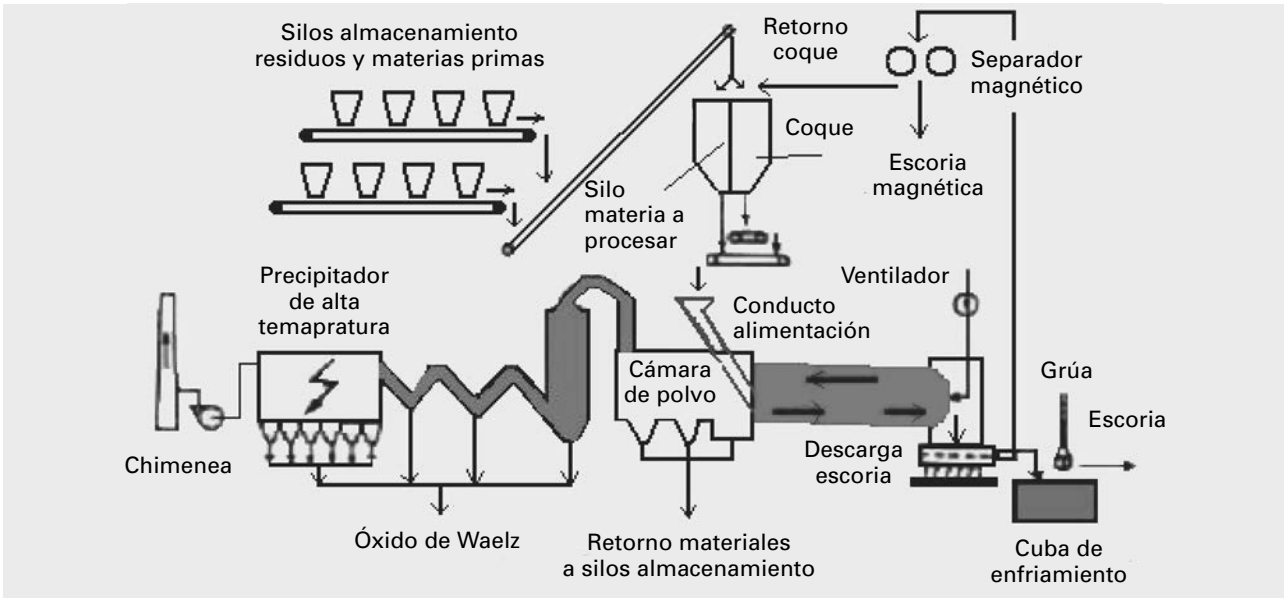


Figura 7.30. Horno para la recuperación del óxido de Waëlz.

Se considera chatarra el conjunto de piezas metálicas (en este caso de hierro) y de fundición inservible y sin utilidad. Debe distinguirse entre:

- *Chatarra reciclada.* Recortes y rechazos de la propia siderurgia.
- *Chatarra de transformación.* Originada durante la elaboración o mecanizado del acero.
- *Chatarra de recuperación.* O la procedente de aparatos, máquinas o vehículos en desuso.

Todos los productos de acero recubiertos con cinc son reciclables. El proceso mas usado para el reciclaje es el horno de arco eléctrico. Las elevadísimas temperaturas provocan la volatilización del cinc, que abandona el horno junto con los gases.

De los gases se obtiene un polvo (denominado polvo EAF: «*Electric Arc Furnace*») constituido, básicamente por cinc (18-35%) y óxido de hierro que después de un proceso de enriquecimiento sirve de materia prima para la obtención del cinc metal. Existen diversas tecnologías para la recuperación del metal a partir de los polvos.

Debido a las especiales propiedades de cinc como elemento protector del acero, los materiales tardan años en entrar en la fase de reciclaje. Así las chapas de automóviles pueden tardar 12 años, los materiales de construcción entre 30 y 100 y las farolas de alumbrado público unos 40 años.

El zinc, una vez oxidado, es un excelente aditivo para los procesos de vitrificación.

4.7. LA RECUPERACIÓN DE METALES DE LOS CATALIZADORES

La utilización de catalizadores se halla muy extendida en el campo de la obtención y síntesis de productos químicos. Los catalizadores contienen metales específicos para la labor que deben realizar, siendo los más frecuentes: V, Ni, Ti, Co, Mo, W, etc.

Cuando los metales presentes en la materia prima a procesar, por ejemplo en el crudo de petróleo, inhiben la labor de los metales catalizadores, éstos deben sustituirse al perder la capacidad para realizar sus funciones básicas, debiéndose tratar entonces como residuos.

El proceso básico de recuperación consiste en la fusión del catalizador agotado. Como sea que dichos metales presentan un elevado punto de fusión, el consumo energético es muy elevado (a veces del orden de las 7.000 kcal/kg), por ello se procura añadir carbón que además de actuar como agente reductor aporta un importante poder calorífico, lo que contribuye a disminuir el consumo global del proceso.

El sistema de recuperación tradicional, cuando el soporte del catalizador es alúmina consiste en la adición de cal para reducir la temperatura de fusión desde 2.000 ℃ hasta unos 1.500 ℃. Simultáneamente se añade una cantidad de carbón para favorecer la reducción de los óxidos a metales. Con estos procesos pirometalúrgicos las tasas de recuperación no suelen superar el 50%. La Figura 7.31 muestra un esquema básico de principio de un proceso de tratamiento de residuos por medio de antorcha de plasma. La composición de la función inorgánica debe ser tal que vitrifique a la temperatura de proceso, de lo contrario se deben añadir aditivos.

La tecnología del plasma permite, en una sola etapa y en continuo, la recuperación de los metales de los catalizadores agotados. Se obtienen tasas de recuperación del 90% para metales como el Co y Mo, obteniéndose los metales en forma de ferroaleación.

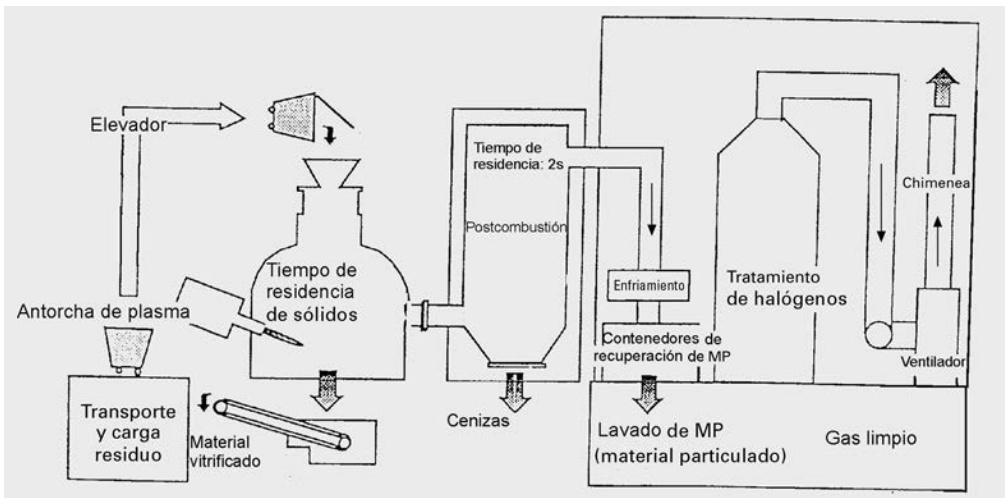


Figura 7.31. Principio de vitrificación por antorcha de plasma.

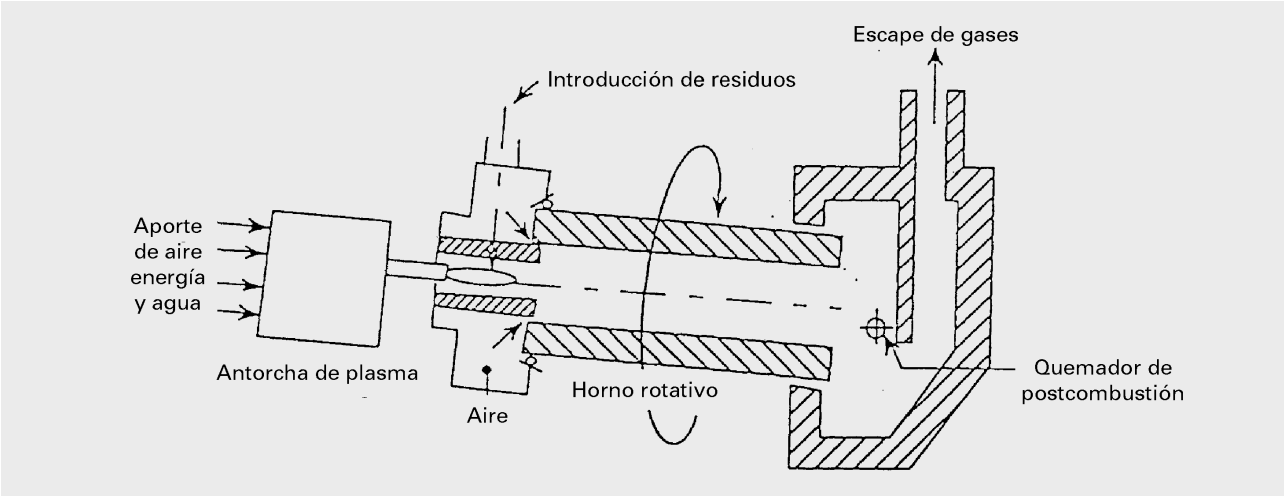


Figura 7.32. Aplicación de la antorcha de plasma a un horno rotatorio.

La Figura 7.32 muestra un esquema de una antorcha de plasma instalada en un horno rotatorio para el tratamiento de catalizadores.

4.7.1. Caso particular de los metales del grupo del platino

Son metales químicamente poco activos y se comportan como metales nobles. El más activo de ellos es el paladio, que se disuelve en el ácido nítrico, el osmio lo hace en nítrico fumante y el platino en agua regia. Completan el grupo el rodio y el rutenio.

Se trata de metales utilizados como catalizadores y debido a su altísimo precio hay interés en recuperar. Todos ellos presentan la particularidad que no son solubles en los vidrios normales, lo que lejos de ser un problema es una ventaja por cuanto se pueden recuperar en forma de metales una vez separado el soporte del catalizador que los contiene.

En el caso de los catalizadores de automóviles el soporte es de cerámica o de acero. En ambos casos el punto de fusión es inferior al de los metales nobles que contiene y actúan como catalizadores. Cuando el gran calor generado por la antorcha lo funde todo, los materiales más livianos, precisamente los soportes de catalizadores, quedan flotando sobre la masa fundida de metales nobles. Se sangran por separado y luego, por métodos tradicionales se recuperan y separan los diferentes metales nobles.

4.8. VITRIFICACIÓN DE CENIZAS DE BIOMASA

En la incineración de la biomasa se genera cantidad variable de cenizas según la materia prima (la corteza es la que mayor cantidad produce). Normalmente la temperatura que alcanza el material en la parrilla no es muy elevada y la ceniza contiene una cantidad importante de materia orgánica. A veces la pérdida al fuego (PF) que ostentan estas cenizas es debida a la presencia de carbonatos o arcillas que, a la relativa baja temperatura de la parrilla no se descomponen.

Se han llevado a cabo numerosos estudios para analizar las características fisicoquímicas de estas cenizas, en particular con el objetivo de ser empleadas para la formulación de hormigones, principalmente por sus potenciales propiedades puzolánicas y elemento activador (Se ha experimentado, con cierto éxito, sustituciones entre el 15 y el 30% de cemento por cenizas). Los estudios concluyen en que se trata mezclas heterogéneas de partículas, de tamaños variables y formas angulosas. Algunas de estas cenizas tienen estructuras celulares, las inquemadas, o las que han resultado parcialmente no combustionadas.

Hay que distinguir entre las cenizas de parrilla o de fondo (*bottom ash*) y las cenizas volantes (*fly ash*). La Tabla 7.21, resume las principales características.

Tabla 7.21. Propiedades físicas de las cenizas de biomasa

	Densidad aparente kg/m^3	Densidad real kg/m^3
Cenizas de parrilla	663-977	1.550-1.750
Cenizas volantes	365-920	2.320-2.760

El hecho es que estas cenizas contengan la misma clase de óxidos de los empleados en la vitrificación, como muestra la Tabla 7.22, hace que se usen en la formulación de vitrificados y esmaltes.

Tabla 7.22. Análisis químico de cenizas de incineración de algunas biomasas

Madera	PF	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	P_2O_5	CaO	MgO	$(Na, K)_2O$
Haya	38,1	7,2	3,0	0,9	3,1	78,0	2,8	2,2
Olmo	45,2	6,8	1,8	0,5	2,2	76,6	5,6	4,8
Encina	31,6	8,1	1,6	0,4	6,5	56,9	4,1	16,1
Grano de cereal	10,7	75,6	1,9	0,6	4,9	7,7	2,9	5,2
Cebada	14,1	61,9	1,3	0,5	5,1	9,1	2,7	18,5
Maíz	15,6	66,6	3,4	2,7	3,7	9,8	3,9	8,4

Como se observa existe una clara diferencia entre las maderas y los cereales. Mientras que las cenizas de aquellas son claramente alcalinas las cenizas de los cereales son ácidas.

En principio ni las cenizas ácidas (granos) ni las leñosas (básicas) son aptas por si solas de ser vitrificadas, puesto que tienen una estructura de óxidos formadores de vidrio con respecto a los fundentes muy desequilibrada y, por esto, es preciso añadir otros compuestos correctores de formulación.

En el caso de las cenizas leñosas, una vez lavadas, se pueden formular vitrificados con temperaturas de maduración sobre los 1.100 ℃, con la siguiente composición en peso:

- Ceniza básica lavada: 50%
- Feldespato potásico: 50%.

Finalmente, la Tabla 7.23 muestra el análisis químico medio de las cenizas volantes y de parrilla como promedio de una serie de residuos de material leñoso. En la tabla es de notar la gran pérdida al fuego que presentan unas y otras, en especial las cenizas volantes. La gran cantidad de materia orgánica presente es un inconveniente para la vitrificación.

La gran cantidad de álcalis presentes en las cenizas volantes explica la corrosión en los tubos de las calderas de biomasa.

4.9. VITRIFICACIÓN DE FANGOS DE EDAR

Nuestra sociedad industrial genera cada día mayor cantidad de residuos. En la medida en que se depuran las aguas residuales, la mayor parte de la contaminación pasa a los fangos con un agravante respecto a las aguas: los elementos contaminantes ahora se hallan concentrados. En contrapartida, los elementos peligrosos, orgánicos e inorgánicos se hallan confinados en un medio semisólido: los fangos más fáciles de controlar. En el Capítulo 12 de esta obra se amplia esta temática.

La mayoría de las legislaciones, al menos de la UE, prohíben llevar los fangos a los vertederos si su humedad es superior al 65%. De ahí la necesidad de recurrir al secado térmico del que se habla extensamente en el Capitulo 12 de esta obra. La entrada en vigor de la Directiva de la 1999/31/CE sobre gestión en depósitos controlados, prohíbe el vertido de materia orgánica en vertederos, consecuente con la idea de la valorización que rige los ejes maestros de la gestión de los residuos.

De acuerdo con la normativa básica ambiental: minimización, valorización y tratamiento, la UE ha dictado en los últimos años una legislación para la gestión de los fangos de EDAR que puede sintetizarse en:

- *Directiva 1999/31/CE* relativa a las restricciones de materia orgánica en el vertido. En la nueva lista de substancias orgánicas se incluyen hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH's) o benzosulfonatos de alquilo (LAS).
- *Directiva 86/728/CEE* que obliga al tratamiento de los fangos. Establece limitaciones temporales y márgenes más estrictos en el contenido de sustancias contaminantes y metales pesados (Cu, Ni, Pb, Zn, Hg y Cr) así como el grado de acidez del suelo. Todo ello reduce las posibilidades de aplicación al suelo y su valorización agrícola por lo que las soluciones energéticas van cada día en aumento.

Tabla 7.23. Análisis químico estándar (% en peso) de diversas cenizas de materiales leñosos

	PF	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	SO_3	CaO	MgO	$(Na, K)_2O$
Cenizas volantes	23,4	26,5	9,0	5,4	4,8	16,0	3,0	6,7
Cenizas de parrilla	9,9	42,3	17,9	12,6	0,4	11,4	2,5	2,2

4.9.1. Residuos secundarios procedentes del proceso térmico

Como se explica en el capítulo destinado a los fangos de EDAR, lo lógico es extraer la energía contenida en el fango, por uno de los procesos habituales: la incineración o la gasificación. La fracción inorgánica resultante de la valorización energética de los fangos procedentes de depuradoras de aguas residuales corresponde, por término medio, al 35% de la fracción seca. La vitrificación aparece como un complemento al tratamiento/valorización energética que incorpora óxidos de metales tóxicos dentro de la red vítrea, convirtiendo a esta tecnología en la más segura para el tratamiento de este tipo de residuos, además de posibilitar el reciclaje posterior al transformar los residuos en materiales aptos para la construcción.

Durante la vitrificación la estructura se torna amorfa y los enlaces químicos se rompen, formando una masa homogénea al aumentar la temperatura. Estos dos procesos no ocurren simultáneamente, sino que los fundentes rompen la estructura cristalina a baja temperatura obteniendo un producto muy activo que induce a la fusión de otros componentes. En este momento se emiten partículas a la atmósfera. Los procesos transcurren con lentitud hasta alcanzar la temperatura de formación de los primeros eutécticos, conjuntamente con la aparición de la fase líquida.

La reacción se inicia siempre en la superficie de los granos, en los puntos de mayor actividad, donde existen cargas libres; por tanto, la fusión será más eficaz al aumentar la superficie específica. Por esta razón es muy importante disponer de un material finamente triturado. Esta es, precisamente, la presentación habitual de los fangos de depuradora una vez gasificada y eliminada la fase orgánica.

Los principales objetivos de la vitrificación son los siguientes:

- Insolubilizar aquellos elementos químicos solubles en agua.
- Minimizar la toxicidad de ciertos metales.

El Consejo de la Unión Europea adoptó el 24 de septiembre de 1996 la Directiva 96/61, relativa a la Prevención y el Control Integrado de la Contaminación (IPPC), y estableció un marco de referencia común dentro del ordenamiento jurídico ambiental, lo que facilita el conocimiento de los requisitos ambientales que deben cumplirse. Los aspectos más relevantes son:

- Establece criterios para determinar los valores límites de emisión, los parámetros y las medidas técnicas equivalentes tomando como referencia las mejores técnicas disponibles.
- Da una visión integrada del procedimiento de autorización para las instalaciones industriales afectadas, coordinando administrativamente la puesta en marcha del permiso único del funcionamiento de las instalaciones.
- Realza la transparencia informativa, poniendo a disposición pública las solicitudes, autorizaciones y modificaciones por parte de la autoridad competente, y publicando un inventario de emisiones de las actividades afectadas.
- Conviene alcanzar un elevado nivel de protección del medio ambiente, controlando la contaminación para evitar emisiones a la atmósfera, agua y suelo, siempre que sea posible. También tiene en cuenta la gestión de residuos, evitando o reduciendo las emisiones al mínimo.

La gasificación y posterior vitrificación de la fracción inorgánica procedente de los fangos de depuradora es el conjunto de tecnologías que mejor se ajusta a lo establecido por la IPPC.

4.9.2. Caracterización de las cenizas de los fangos de EDAR

La Tabla 7.24 muestra un análisis tipo de la fracción inorgánica de un fango de EDAR correspondiente a una depuradora de una ciudad que tienen polígonos industriales en sus alrededores.

Como se observa, el análisis muestra que se trata de una mezcla que tiene muy poco formador de vidrio (SiO_2 y P_2O_5) y demasiados fundentes. Por ello es preciso llevar a cabo un estudio para adicionar los aditivos que corrijan esta composición.

Por otra parte la ceniza, según el sistema de conversión energético empleado, no suele separarse sola sino que viene acompañada de una cantidad impor-

Tabla 7.24. Análisis químico estándar de un fango de EDAR calcinado

	Óxidos diversos	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	P_2O_5	CaO	MgO	$(Na, K)_2O$
Ceniza fango EDAR	8,9	18,1	4,2	25,72	10,8	26,62	2,71	2,9

tante de correctores para neutralizar los gases ácidos que se forman en el proceso térmico como consecuencia de la presencia de Cl y/o S, una cantidad de carbón activo preciso para adsorber metales y una cierta cantidad de material particulado.

4.9.3. Valorización total y residuo cero en la gestión de fangos de EDAR

La ecología industrial es una disciplina que intenta reproducir en los ciclos industriales lo que la naturaleza realiza en los ecosistemas naturales. Es difícil conseguir la valorización integral de residuos para alcanzar la fase de residuo cero, aunque las nuevas tecnologías y la integración de los sistemas de valorización abren nuevas vías para la consecución de este objetivo.

El único residuo generado en la valorización energética del fango es el polvo proveniente del filtro de mangas del lavado de gases. Esta cantidad, en la incineración de RSU, es de un 3% respecto la cantidad de materia entrante. En fangos de EDAR la cifra será superior, ya que su fracción inorgánica es elevada y, sobre todo debido a su tamaño de grano tan pequeño es arrastrado por la corriente de gases en forma de cenizas volantes. Independientemente de la naturaleza del residuo, la vitrificación permite transformar residuos peligrosos en materiales de construcción, cumpliendo con el principio del residuo cero.

El horno de «*cold top*» impone otra dinámica partiendo del fango seco. Esta variante, adecuada para el tratamiento de grandes cantidades de fango presenta las siguientes características:

- Recepción y homogeneización de fangos secos.
- Valorización energética y producción de energía eléctrica a partir de la fracción orgánica de los fangos. Para conseguirlo se puede recorrer a la incineración o a la gasificación.
- Depuración de los efluentes gaseosos procedentes de la caldera de recuperación.
- Vitrificación en horno «*cold top*» de la fracción inorgánica de los fangos de EDAR, junto con los aditivos externos necesarios y el polvo resultante de la depuración de gases.
- Fabricación de material de construcción de primera calidad a partir del material vitrificado.

El proceso de fabricación se lleva a cabo en un horno eléctrico de capa fría en circuito cerrado: todo el material entrante sale vitrificado, sin producir emisiones ni residuos, ya que el polvo del filtro de mangas también se vitrifica.

La Figura 7.33 esquematiza este proceso, completando el ciclo de materia no generando residuos y cerrando el ciclo energético al utilizar la energía térmica del propio fango para desarrollar la energía eléctrica necesaria en el proceso. Según la relación

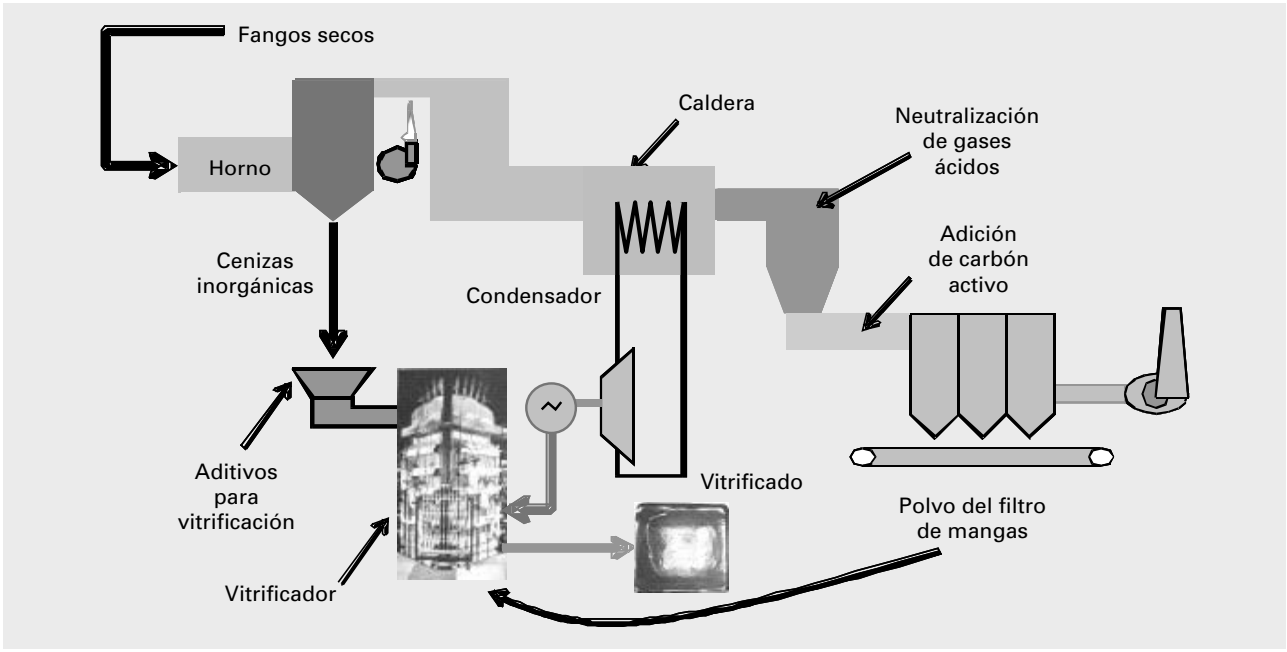


Figura 7.33. Vitrificación de fangos de EDAR y sistema de residuo cero.

entre la fracción orgánica e inorgánica es posible que se requiera algo de electricidad externa.

Este modelo de gestión incorpora los fangos ya secos, por lo que no es necesario invertir energía para el secado previo, así toda la energía liberada se empleará íntegramente en la producción de vapor. Este proceso se puede considerar de residuo cero, ya que no genera ningún tipo de residuo secundario al vitrificar el polvo del filtro de mangas.

4.10. VITRIFICACIÓN DE RESIDUOS GALVÁNICOS

La industria de recubrimientos de superficie dispone de una depuradora donde al agua residual se le añade hidróxido sódico hasta llevarla a un pH suficientemente alcalino para precipitar los metales presentes, generalmente Ni, Cr, Zn, etc., en sus correspondientes hidróxidos. Después de un tiempo prudente de contacto para que tenga lugar la reacción, el agua se conduce a un filtro prensa donde se forman las tortas de filtro.

La Tabla 7.25 reproduce los análisis químicos del lodo galvánico típico, junto a componentes esenciales para lograr la vitrificación, como el cuarzo y el feldespato.

El lodo galvánico indicado en la tabla no corresponde a un proceso determinado sino que se trata de una mezcla de lodos de diversas industrias de tratamiento de superficies, donde lo más destacable es que la cantidad de metales pesados en el «lodo estándar» supera el 45%. En primar lugar se debe proceder al secado de las tortas ya que habitualmente abandonan el filtro prensa con una humedad del 40%. Seguidamente se debe mezclar con las otras materias primas y aditivos donde, al menos el cuarzo también puede ser residual si se usa arena de fundición. Lo mas sencillo es comenzar por imitar la composición de un vidrio sódico-cálcico, cuya estructura es la siguiente:

- SiO_2 60,0%
- Na_2O 28,4%
- CaO 8,6%
- K_2O 1,0%
- Al_2O_3 2,0%

Por tanto, se tratará de ir añadiendo cantidades progresivas de lodo galvánico y comprobar como evolucionan las características del vidrio obtenido. La mezcla preparada se introduce en el horno de fusión hasta alcanzar los 1.500 ℃, con una velocidad de calentamiento de 10 ℃/minuto. Finalmente se procede a un tratamiento de recocido a una temperatura de 500 ℃ por un periodo de dos horas para eliminar tensiones.

Mezclas en las que se ha adicionado hasta un 40% de lodos estándar se observa una carácter predominantemente amorfo del vitrificado. Sin embargo, cuando se añade precisamente esta cantidad comienza un proceso de desvitrificación donde se aprecian formaciones de silicato de cromo y de sodio, el resto de recristalizaciones corresponden a silicatos alcalinos y alcalinotérreos.

El balance de masas señala que hay pequeñas pérdidas de algunos metales pesados Cr, Ni, Cu, Zn y Pb. Este hecho es debido a la volatilización parcial de alguno de estos metales y a la difusión de estas especies hacia el interior del crisol. Dejando al margen esta última característica en la que, en último término los metales no se emiten, el problema se puede abordar bajo dos vertientes:

- Formulación: Diseñando un vidrio que presente un punto de fusión muy bajo de manera que pueda captar el óxido de metal pesado antes de que éste alcance la temperatura de volatilización.
- Horno. Usando un horno de «capa fría», donde se forman una serie de eutécticos y no se emite nada.

El tema de la formulación es complejo. Un vidrio con más lodo galvánico es más resistente a la lixiviación que un vidrio sódico/cálcico, ello puede ser debido a que en la nueva estructura (con metales) hay una mayor cantidad de átomos unidos a un tetraedro de sílice. Al sustituir átomos de alcalinos y alcalinotérreos por metales con valencia mayor de uno, se pueden establecer enlaces con más de un tetraedro de sílice, dando lugar a una red más estable.

Tabla 7.25. Análisis químico comparado del lodo galvánico y otras materias primas

	Otros	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	P_2O_5	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	Cr_2O_3	CuO	NiO	ZnO	PbO
L. Galvánico	1,6	22,0	0,9	1,1	1,2	14,0	3,5	0,2	1,2	21,0	6,9	13,0	4,7	1,3
Cuarzo	0,3	98,0	0,9	0,2	—	0,1	—	0,2	0,2	—	—	—	—	—
Feldespato	0,1	71,7	15,9	0,6	—	0,5	—	6,2	4,9	—	—	—	—	—

A veces (según formulación) se trata de un vidrio que presenta una resistencia débil al ataque hidrolítico, fácil de lixiviar como se diría en términos ambientales, como resultado de la hidrólisis del enlace Si-O. Durante el tiempo del ataque tiene lugar la formación de una rica capa de sílice (al microscopio se aprecia una fina lámina de sílice que «envuelve al resto») que actúa como inhibidor de la corrosión del vidrio producida por la adición de los cationes Zn^{2+}, Cu^{2+} y Pb^{2+} presentes en la lama galvánica.

De los vidrios formulados se puede concluir que:

- Se puede llegar a incluir en la formulación de un vidrio hasta un 40% de lodos galvánicos.
- La emisión de metales puede ser nula si se emplean hornos de «capa fría».
- Los vidrios con lodos galvánicos resisten mejor el ataque de los ácidos que el vidrio sódico/cálcico normal (El vidrio con un 22% de lodo tiene una pérdida de masa, lixiviación, de 135 mg/dm^2, mientras que el sódico/cálcico en iguales condiciones es de más de 200 mg/dm^2).
- Frente al ataque de las bases, los vidrios con unos porcentajes de 0 a 25% de lodo galvánico se comportan de manera similar a los sódico/cálcicos, mientras que si se incrementa la proporción de lodo, la resistencia a la agresión alcalina, disminuye.

4.11. VITRIFICACIÓN DE RESIDUOS DE MINERÍA

La minería, actividad básica dedicada a la obtención de los georrecursos para la industria transformadora imprescindible es para el sostenimiento de la calidad de vida de la humanidad es una industria que produce mucho impacto ambiental.

La generación de residuos debido a la actividad minera es tan importante que en la mayoría de países de la UE, catalogados de no mineros, o sea que su actividad en este terreno se limita a la minería para materiales de construcción, la también denominada minería no metálica y no energética, la cuota minera se puede cifrar en el 25% del total. Esto es, si la cifra media total es de 20 kg/h · día, la actividad minera supone 5 kg de residuos por habitante y día. En países mineros, como Chile, esta cifra puede alcanzar fácilmente los 300 kg. Esto da una idea de la magnitud del problema.

Excepto los periodos entre las dos guerras mundiales, el crecimiento de la demanda de productos de minería ha sido exponencial y no guarda relación, como muestra la Tabla 7.26, con el aumento demográfico, máxime si se tiene en cuenta que el 20% de la población mundial domina cerca del 70% de los recursos.

Tabla 7.26. Generación de metales vs. población mundial

Producciones	1870	1970	1983	2000
Población (x 10^6)	1.200	3.652	4.679	6.270
Índice	1	3	3,9	5,2
Hierro y acero (t x 10^6)	21	595	664	900
Índice	1	28	31	43
Cobre (t x 10^3)	105	6.420	9.115	13.000
Índice	1	62	87	130
Plomo (t x 10^3)	286	3.410	5.285	12.000
Índice	1	12	18	42
Zinc (t x 10^3)	177	5.465	6.355	11.000
Índice	1	31	36	62
Aluminio (t x 10^3)	1	10.257	15.466	43.000
Índice	1	10.257	15.466	43.000

4.11.1. Problemática ambiental de los residuos mineros

El problema ambiental asociado a las actividades mineras ha existido siempre, no obstante no es hasta los primeros años del siglo XX que debido a la facultad humana de transformar el entorno natural, se ha originado un desequilibrio entre los deterioros ocasionados y la capacidad de recuperación natural frente a las agresiones.

Hoy en día se tiene conciencia de la limitación de los recursos, así como del terrible impacto ambiental y, a veces irreversible, que ciertas actividades provocan en nuestro hábitat que obliga a compaginar esta actividad con el respeto al entorno.

El caso de la minería del cobre es bien significativo. El ciudadano que no vive en un país productor no es consciente de que el disfrute de 1 kg de metal supone la generación de casi 650 kg de residuos. La distribución de los mismos es la siguiente:

- Relaves. (50% polvo fino + 50% agua) 80,0 t/t Cu
- Escoria de fundición 1,8 t/t Cu
- Ripios. Lodos de proceso y lixiviación 190,0 t/t Cu
- Estéril de mina 377,0 t/t Cu

Estos lodos (que se hallan depositados sin ningún tipo de pretratamiento en las balsas) y los llamados polvos de fundición revisten una especial peligrosi-

dad ya que contienen gran cantidad de arsénico, al margen de todo tipo de metales pesados. En el Capítulo 9 se amplia esta temática.

4.11.2. Vitrificación de polvos de fundición de cobre

Se entiende por polvos de fundición aquellos que se extraen de la etapa de depuración de gases de los hornos de fundición del mineral. En el caso del cobre, como en otros muchos metales, el metal suele estar en forma de sulfuro, por tanto, la presencia de SOx esta asegurada. Sin embargo, la eliminación o limitación de las emisiones de SOx no representa ningún problema técnico.

El problema real son los metales que se hallan asociados al metal base. Así en el caso del cobre, y en particular en la cordillera de los Andes, los minerales de los que se extrae el cobre suelen contener otros metales indeseables tanto desde el punto de vista técnico como ambiental como el arsénico, el antimonio, el cadmio, el mercurio, el bismuto, etc.

En la torre de neutralización de los gases ácidos antes de su emisión al exterior se suele inyectar lechada de cal, puesto que es más económica que el bicarbonato sódico, el resultado es que en el filtro de mangas posterior se recoge sulfato cálcico y arseniatos o antimoniatos de cal en forma de polvo, de ahí el nombre de polvos de fundición.

Estos polvos de fundición, a diferencia de las escorias, no tienen ninguna fase vítrea. Están formados por un conjunto de óxidos y metales sin ningún tipo de cohesión entre ellos. De ahí deriva la gran facilidad de lixiviar bajo cualquier condición del entorno exterior. La vitrificación constituye una perfecta solución para su tratamiento y valorización.

La Figura 7.34 reproduce un esquema de una instalación de depuración de gases procedentes de una fundición minera. El polvo recogido en un filtro de mangas está constituido por materiales inorgánicos y para fundirlos se precisa del concurso de una notable cantidad de combustible en un recinto, horno, de dimensiones limitadas, ello explica el porque de emisiones de material particulado, incluyendo material orgánico y restos de combustible. Por ello el esquema de la instalación de depuración añade una inyección de carbón activo. El efecto de este coque es doble, adsorbe los restos de combustible, habitualmente hidrocarburos policíclicos y, sobre todo metales ya que las finas partículas de carbón hacen las veces de sumidero.

Es obvio que la caracterización de estos polvos incluye, al margen del material particulado, en este caso el menos agresivo, material orgánico muy peligroso (hidrocarburos policíclicos) y polvo de carbón repleto de metales pesados además, claro está, de los arseniatos citados.

Para complicar más el tema, estos polvos de fundición tienen una caracterización que demuestra que no van a vitrificar a no ser que se añadan una serie de aditivos, comenzando por el cuarzo, como formador de vidrio por excelencia. Es en este punto donde surge la sinergia de combinar la escoria vitrificada de la propia minería como agente vitrificante.

Desde el punto de vista ambiental esta propuesta, además de eliminar el problema de la colocación del subproducto (la escoria enfriada), la combinación resuelve el problema ambiental del tratamiento del polvo de fundición. La escoria es de naturaleza vítrea, por tanto no ha de fundir. Tan solo se precisa

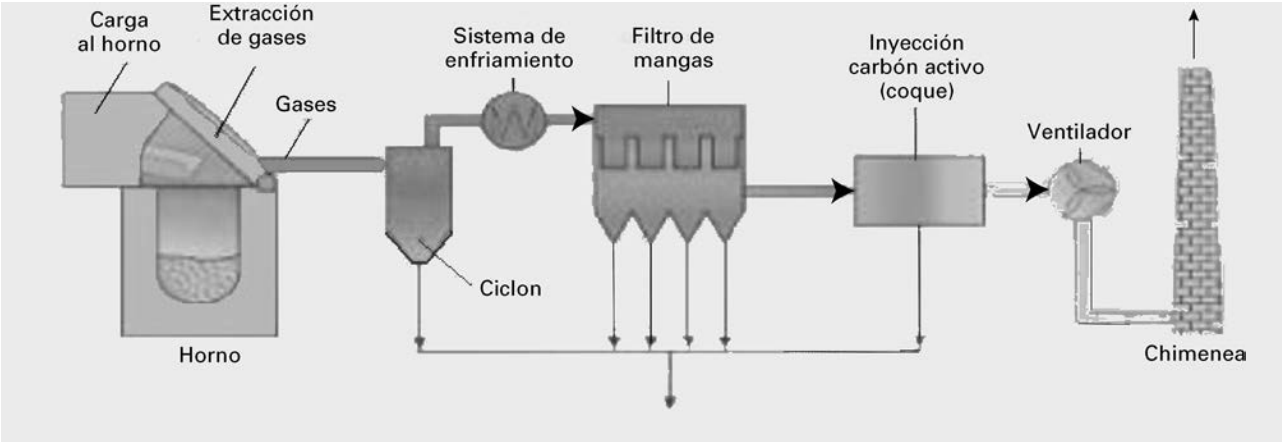


Figura 7.34. Depuración de gases de fundición.

elevar la temperatura para que vuelva a ser un líquido de baja viscosidad. Como que ello tiene lugar a relativa baja temperatura, el punto de reblandecimiento de estos vidrios está sobre los 600 ℃, la reactividad comienza a baja temperatura, o sea a partir de esta temperatura empieza a atacar el polvo de fundición y a integrarlo en su matriz vítrea.

Como ya se ha comentado en otros apartados, si además se emplea la fusión eléctrica, en su variante de «capa fría», el peligro de la posible volatilización de algún metal pesado procedente del polvo de fundición es mínimo, por no decir nulo.

El resultado de este nuevo proceso, la vitrificación de los polvos de fundición, es la inertización de tan peligroso residuo. Ahora bien, desde la óptica económica para que el proceso no resulte oneroso hay que procurar que el material obtenido (valorizado) tenga una salida fácil y buen precio en el mercado.

5. Vitrificación de materiales radioactivos

Se denomina residuo radioactivo a cualquier material o producto de desecho, para el cual no está previsto ningún uso, está contaminado o que contiene radionucleidos en concentraciones o niveles de actividad superiores a los establecidos por la autoridad competente, previo informe del Consejo de Seguridad Nacional.

La contaminación se define como la presencia indeseada de radionucleidos en el ser humano (contaminación personal) o en el entorno que lo rodea (contaminación ambiental). En el caso de que la contaminación afecte al ser humano, esta puede ser interna (ingestión a través de alimento o por medio del aire) o externa (los radionucleidos se depositan en la piel). Así se puede resumir:

- Radiodiagnóstico: Irradiación externa SI; Contaminación NO.
- Radioterapia: Irradiación externa SI; Contaminación INFRECUENTE.
- Medicina nuclear: Irradiación externa SI; Contaminación SI.
- Radioinmunoensayo: Irradiación externa MUY BAJA; Contaminación SI.

ENRESA (Empresa Nacional de Residuos) es la empresa que tiene competencia exclusiva sobre los residuos radioactivos generados en España. en junio de 2006 presentó al Consejo de Ministros, el Sexto Plan General de Residuos Radioactivos (PGRR), que fue aprobado, donde se trazan las estrategias principales que deben llevarse a cabo sobre este tipo de residuos. Según el documento, las estimaciones de residuos a gestionar son:

- 12.800 m^3 de residuos de alta actividad, básicamente combustible gastado (la palabra encierra un cierto eufemismo ya que, con el estado de la tecnología actual, se considera agotado cuando se ha consumido un 5% del mismo). Ello obliga a la construcción de un Almacén Temporal Centralizado, posponiendo las decisiones relativas a su gestión definitiva.
- 176.000 m^3 de residuos de baja y media actividad.

En el caso de los residuos de alta actividad, en particular los procedentes de la industria militar, en EE UU, Rusia y Gran Bretaña, una vez concluida la guerra fría se están llevando a cabo programas para reciclar estos peligrosísimos residuos. Cabe destacar la conversión de una mezcla de U/Pu en un óxido (MOX) para su empleo como combustible en reactores nucleares para la generación de electricidad. Un nuevo combustible denominado IMF consta tan solo de Pu como elemento fisionable, lo que representaría una oportunidad única para sacar de la circulación los residuos o ingenios nucleares que contienen este elemento.

Al margen de los residuos radioactivos de alta y media intensidad, de los que se hablará más adelante, las actividades modernas producen residuos radioactivos procedentes de innumerables fuentes como:

- *Medicina:* en el radiodiagnóstico, que consiste en la irradiación de pacientes por medio de una fuente externa para obtener información varia interna del organismo.
- *Radioterapia* o irradiación selectiva de un tejido enfermo, usando focos emisores encapsulados externos al paciente.
- *Medicina nuclear:* administración o utilización de sustancias radioactivas no encapsuladas con finalidad terapéutica o diagnóstica.
- *Comercio y servicios:* transporte, utilización y manipulación de sustancias o aparatos radioactivos que las incorporan para finalidades propias del sector. Por ejemplo, aparatos de difracción de rayos-X, detectores de armas, etc.

- *Investigación:* transporte, utilización y manipulación de sustancias o aparatos radioactivos que usan o incorporan estas fuentes con fines de investigación en el campo tecnológico, científico, etc.
- *Industria:* radiografías, gammagrafías de exploración y control de la calidad. Determinación del espesor de ciertos productos, verificación de soldaduras, detección de niveles, trazadores radioactivos, esterilización de material clínico, conservación de alimentos, etc.

El poco conocimiento del personal al cuidado de estas instalaciones y la falta de datos sobre las consecuencias ha conducido a la presencia incontrolada de numerosos residuos, la mayoría líquidos, con elevada presencia de isótopos radioactivos. Por lo que hace referencia a las aplicaciones no sanitarias de las radiaciones ionizantes, el panorama es igualmente desolador pero no afecta a un colectivo tan numeroso como en el caso de las aplicaciones médicas. La Tabla 7.27 expone un resumen de la cantidad de isótopos más habituales empleados para estos fines.

La creencia normal es que el isótopo radioactivo más dañino es el que tiene un periodo de desintegración más largo y esto no es rigurosamente exacto. Desde el punto de vista de la sanidad el concepto de vida biológica media o periodo biológico medio, es el tiempo en el cual el organismo elimina el 50% de la sustancia. Uno de los mecanismos que intervienen en este proceso es la excreción. Este parámetro depende, además del radionúcleo considerado, del individuo en cuestión. El peligro radica en que el isótopo pueda llegar a integrarse en un tejido.

Tabla 7.27. Isótopos radioactivos normalmente usados en la industria y la medicina

Utilización	Isótopo radioactivo
Radioterapia de baja intensidad	Cesio 137 e iridio 192
Radioterapia de alta intensidad	Iridio 192
Irradiación de productos sanguíneos	Cobalto 60, cesio 137
Irradiación industrial	Cobalto 60, cesio 137
Medidas de espesor	Cobalto 60, kriptón 85, cesio 137, americio 241
Medidas de nivel	Cobalto 60
Medidas de densidad y humedad	Americio 241, berilio 9, cesio 127
Radiografías industriales	Cobalto 60, iridio 192
Fluorescencia de rayos-X	Hierro 55, americio 241, plutonio 238
Cromatología gaseosa	Níquel 63, tritio
Detectores de gases	Americio 241

Así un isótopo como el ^{32}P tiene un periodo físico de desintegración de solo 14,3 días, por tanto, se podría pensar que se trata de un radionúcleo inofensivo. Sin embargo se trata de un elemento químico muy abundante en el organismo humano y su vida biológica es de 257 días con un nivel de radiación alto. Por tanto, puede producir alteraciones, mutaciones y disfunciones fisiológicas graves.

A estos problemas, teóricamente controlables, habría que añadir otras fuentes de radioactividad de más difícil control. Como por ejemplo, la existencia de chatarra radioactiva. El problema surge cuando personal sin escrúpulos mezcla, en una partida de chatarra férrea normal, un aparato o residuo contaminado radioactivamente. Según el Consejo de Seguridad Nuclear Español, la probabilidad de que un camión cargado de chatarra contenga un residuo radioactivo está en 1 de cada 1.000 camiones. El porcentaje es bajo pero añade un motivo de intranquilidad al problema.

En la misma línea del párrafo precedente pero en la vertiente alimentaria se puede citar el caso del sulfato bicálcico, producto empleado en la fabricación de piensos para animales. El sulfato bicálcico se produce a partir de la fosforita (roca fosfórica muy abundante en el Sahara) que presenta radioactividad en estado natural, en concreto ^{238}U, ^{210}Pb y ^{210}Po en unos niveles de 1.400 bequerelios por kilo (este problema es uno de los ingredientes a que hace referencia la última parte de este capítulo en el tratamiento de los residuos sedimentados en el pantano de Flix). El problema es que al ser ingeridos se acumulan en el organismo y la alta radiación emitida puede romper el ADN de las células. Es bien sabido que el Po es un elemento radioactivo presente en el humo del tabaco y una de las causas del cáncer de pulmón.

A partir de observaciones de minerales naturales (zirconolitas) que contienen altos contenidos en elementos radioactivos, y que a pasar de ello presentan una estructura y resistencia a la corrosión y alteración, se han desarrollado materiales vitrocerámicos que sirven para la inertización de residuos con radionúcleos. Así la citada zirconolita ($CaZrTi_2O_7$), además del rutilo (TiO_2), la hollandita $BaAl_2Ti_6O_{16}$ o la perovsquita $CaTiO_3$, podrían acomodar hasta un 30% en peso de residuos radioactivos de alta intensidad. También materiales que den lugar a fases tipo

nefelina y pirocloros $Ca_2Ti_2O_7$ pueden albergar hasta un 50% en peso de PuO_2 y/o UO_2, incluyendo la incorporación de elementos absorbentes de la radiación de neutrones como Gd, Hf y ^{68}Sm.

Las principales características que distinguen los residuos radioactivos son:

- *Por su origen:* fuente de producción.
- *Características radiológicas:* Vida media, capacidad de generación de calor, intensidad de la radiación emitida, actividad, concentración de radionúcleos, dosis emitidas.
- *Características físicas:* Estado (sólidos, líquido o gas), tamaño, volumen y peso, compresibilidad, volatibilidad, solubilidad, etc.
- *Características químicas:* Resistencia a la corrosión, contenido de materia orgánica, combustibilidad, reactibilidad, generación de gases, etc.
- *Características biológicas:* Descomposición, productos de la descomposición.

Por su nivel de radioactividad, en Rusia, se clasifican de acuerdo con:

- *Alta radioactividad:* $\alpha > 10^6$, $\beta > 10^7$, radionúcleos trasuránicos $> 10^5$.
- *Media radioactividad:* $\alpha < 10^6$ y $> 10^2$, $\beta < 10^7$ y $> 10^3$, radionúcleos trasuránicos > 10 y $< 10^5$.
- *Baja radioactividad:* $\alpha < 10^2$, $\beta < 10^3$, radionúcleos trasuránicos < 10.

En el Capítulo14 de esta obra se incide en el tratamiento de los residuos de alta actividad desde el punto de vista del depósito.

Es preciso distinguir entre la radiación natural, siendo la mas importante la radiación de fondo (o cósmica) que llega a la Tierra desde el espacio y da lugar a una dosis efectiva de 2,4 Sv, seguida de la denominada radiación terrestre que se manifiesta a través del gas radón 1,2 Sv, como último eslabón de la cadena de desintegraciones de isótopos naturales presentes en la corteza terrestre. Entre ambas suman el 75% de la irradación a la que estamos sometidos los seres humanos. El resto, en términos de dosis efectiva, en Sievert (Sv), se compone de:

- Diagnósticos médicos: 1,0 Sv.
- Pruebas nucleares: 0,01 Sv.
- Actividades profesionales (científicas, investigación, etc.): 0,002 Sv.
- Producción de energía termonuclear: 0,0002 Sv.

Solo en EEUU los hogares afectados por gas radón pueden causar, al menos 30.000 casos anuales de muertes por cáncer de pulmón. No pudiéndose evitar la causa de producción del radón (desintegración natural del uranio) se debe mantener una ventilación en los sótanos adecuada para evitar la concentración del gas radioactivo en la vivienda.

5.1. VITRIFICACIÓN DE RESIDUOS DE ALTA TOXICIDAD

Los metales pesados, en el proceso de vitrificación quedan insertos en la matriz vítrea formando parte de ella y los diversos óxidos establecen unos enlaces entre ellos que constituye la esencia de la naturaleza vítrea. Cuanto más estables sean estos enlaces, más resistencia a la lixiviación presentará el vitrificado. Por estos motivos, la inmensa mayoría de autores están de acuerdo en que la vitrificación es la tecnología más segura para inertización de residuos inorgánicos peligrosos.

La Figura 7.35 muestra una línea de vitrificación de residuos en contenedores (de manera análoga a lo que se lleva a cabo con los residuos radiactivos). En el primer recipiente se mezcla el residuo con los elementos formadores de vidrio y, si es preciso, con fundentes. Después de pasar a un depósito que hace las veces de homogenizador y alimentador, el residuo se introduce en el horno.

El horno dispone de calefacción eléctrica para minimizar la emisión de gases. En cualquier caso los gases junto con los posibles volátiles y partículas arrastradas son conducidos a un enfriador, previo paso por la estación de filtraje y lavado, antes de ser emitidos al medio.

El residuo fundido se introduce en contenedores en forma de botella. Cuando están llenos se conducen al vertedero o a un depósito de seguridad.

5.2. RESIDUOS DE ALTA Y MEDIA INTENSIDAD

Es bien sabido que un gramo de uranio débilmente enriquecido produce la misma cantidad de energía que 50 kg de petróleo. Sin ánimo de entrar en debates sobre la idoneidad o no de la energía de origen nuclear, vale la pena meditar sobre unos cuantos datos:

- En un futuro próximo, la tasa de consumo de energía per cápita aumentará poco en los países industrializados pero se incrementará en los subdesarrollados, con lo que el consumo de combustibles global será mayor.

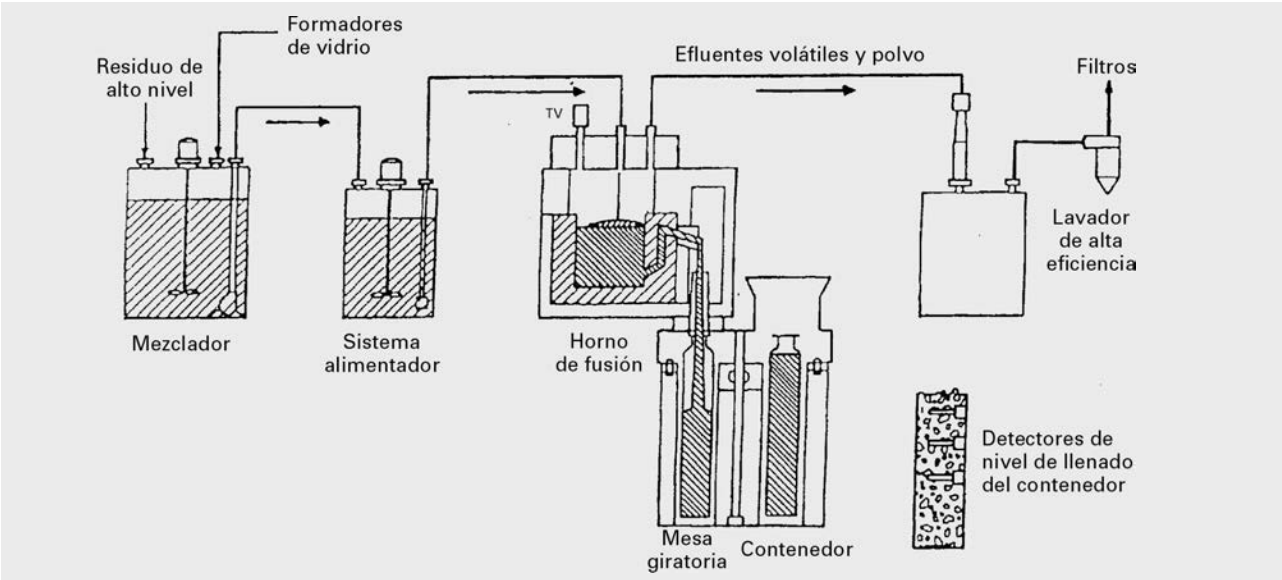


Figura 7.35. Vitrificación de residuos de alta toxicidad.

- Las reservas probadas de petróleo del planeta no alcanzan para más allá del año 2070, si bien las de gas natural y carbón son notablemente mayores. Sin embargo las de uranio son muy importantes y, a diferencia de los anteriores combustibles, no sirve para otra cosa que para producir energía.
- El efecto invernadero que provoca el consumo de combustibles fósiles es enorme e irá en aumento.
- Los análisis de ciclo de vida sobre los tipos de centrales eléctricas arrojan datos sorprendentes. Por ejemplo, las centrales hidroeléctricas, al margen del impacto visual y de irreversible alteración de la fauna y flora de los cauces, modifica gravemente la edafología de los terrenos agua abajo, etc., y contribuyen al efecto invernadero si se tiene en cuenta el gran consumo energético generado durante la fabricación de los materiales de construcción empleados en construir la gran obra civil.

No obstante las centrales termonucleares, de las denominadas de segunda generación, cuya tecnología se remonta a los años 1960, generan una variedad de residuos radioactivos complicados de gestionar.

5.2.1. Los residuos de las centrales termonucleares

Una central nuclear de una potencia eléctrica de 1.000 MW genera, anualmente, un total de 450 m^3 de residuos radioactivos procedentes de la explotación que deben ser acondicionados, tratados y embidonados para su almacenamiento definitivo y también residuos vitrificados, procedentes del combustible procesado. Aproximadamente solo el 1% de los residuos producidos son los susceptibles de generar calor en cantidades apreciables.

- Los residuos de alta actividad (RAA) representan el 6% del total. Los principales son: Vitrificados 1-3 m^3/GWh y año. Vainas 10 m^3/GWh y diversos de 1 a 2 m^3/GWh.
- Los residuos de baja y media actividad (RBMA) son el resto, 94%. Lodos de tratamiento de residuos 5 a 10 m^3/GWh y año. Resinas y productos de corrosión 500 m^3/GWh y otros de 25 a 50 m^3/GWh.
- Residuos de muy baja actividad. Se trata de los residuos mineros. Del orden de 100.000 m^3/GWh y año.

De hecho los residuos de alta intensidad, susceptibles de tratar, proceden de las plantas de reprocesamiento de los combustibles de fisión y se presentan en forma de soluciones nítricas concentradas física y químicamente complejas. Así el ^{137}Cs y el ^{90}Sr emiten radiaciones β y γ con periodos de semidesintegración de 30 y 90 años respectivamente, considerados cortos, el ^{131}I es extremadamente corto: de solo 8 días pero, también hay otros de muy largos como el ^{239}Pu con 24.000 años o el ^{237}Np con un periodo de 2,14 millones de años. El Cs pue-

de ser expulsado del organismo humano con ciertos cuidados, no obstante el Sr es asimilado ya que el organismo lo confunde con el Ca, lo mismo sucede con el I que, a pesar de su periodo de semidesintegración tan corto, se instala en la tiroides y provoca el típico cáncer.

Un vidrio correctamente diseñado ha de permitir confinar todos los elementos radioactivos en la matriz vítrea con dos características sobresalientes: que sea un vidrio químicamente estable y resistente térmicamente a las solicitaciones que generará la emisión de partículas radioactivas. De hecho el proceso de vitrificación consta de dos etapas. Una primera en la que se evapora el agua y la fracción sólida se seca y se calcina. La segunda, propiamente de vitrificación, donde se añaden los aditivos precisos y se funde el vidrio.

Para dar una idea de lo que significa «confinar» elementos radioactivos en el seno de una matriz vítrea, vale la pena recordar algunas de las propiedades de las principales partículas que emiten los radionúcleos:

- *Partículas α:* Son partículas con masa. 1 g de radio emite, por segundo, $3{,}57 \cdot 10^{10}$ partículas alfa. Produce daños importantes a distancias cortas. La carga eléctrica es positiva y se emiten a una velocidad de $1{,}6 \cdot 10^7$ m/s (16.000 km/s).
- *Partículas β:* Están cargadas negativamente. Tienen la misma masa y carga eléctrica que un electrón. Pierden alrededor de 30 ev por colisión. Las velocidades de salida son enormes, pudiendo alcanzar 0,995 veces la velocidad de la luz.
- *Partículas γ:* Se trata de ondas electromagnéticas, fotones, de longitud de onda muy corta. Por su naturaleza, su interacción con la materia es difícil pero, cuando lo hace arranca un electrón de su órbita y le comunica tanta energía que éste hace las veces de una partícula β.
- *Neutrones*. Inciden en la materia, atraviesan toda la corteza electrónica e interaccionan directamente en el núcleo, produciendo ionización o radioisótopos.

Conviene exponer la peligrosidad de las partículas que emiten los isótopos ya que, con frecuencia son mas agresivos los isótopos hijos. Así, el uranio por si mismo es poco dañino ya que su velocidad de semidesintegración es muy baja. Sin embargo, los isótopos hijos son mucho más radiactivos.

Finalmente hay que indicar que, además de los residuos sólidos antes indicados, las centrales nucleares generan otros tipos de residuos, como:

- Residuos gaseosos, 400.000 curios/GWh ^{85}Kr, 15 kg de criptón estable, 120 kg de xenón estable, 1,5 kg de ^{129}I, ^{131}I, 1,1 kg de yodo estable y 15.000 curios/GWh de tritio.
- Residuos líquidos de larga vida, con emisiones de partículas β y γ.

5.3. VITRIFICACIÓN DE RESIDUOS RADIOACTIVOS

Los residuos de baja y media actividad se producen en las centrales nucleares, hospitales e instalaciones que utilicen fuentes radioactivas. Los residuos de alta actividad proceden del combustible nuclear usado en las centrales de fisión y, normalmente, se almacena en el mismo reactor.

La distribución de la gestión de los residuos radioactivos es la mostrada en la Figura 7.36.

El sistema tradicional de tratamiento de residuos radioactivos de media y baja actividad consiste en el confinamiento en unos contenedores que poseen una triple protección: hormigón, plomo y acero. Con el paso de los años la radiación liberada genera un calor que al no poder ser disipado provoca grietas hasta la rotura del contenedor por choque térmico.

Es evidente que la vitrificación del residuo radioactivo no va a mitigar, en absoluto, la emisión de partículas radioactivas pero si a disminuir la densidad de la radiación, por cuanto el material radioactivo una vez vitrificado se aloja en un soporte de vidrio que presenta una masa notable con respecto al residuo radioactivo. Por otra parte si el vidrio diseñado es buen conductor del calor y tiene una elevada resistencia mecánica, lo hará mucho más resistente al choque térmico.

Como unidad de radioactividad se estableció el Curie, el cual fue definido como la cantidad de radón en equilibrio con un gramo de radio. Después fue extendido a otros elementos radioactivos. El Curie (Ci), es la unidad equivalente a la actividad de 1 g de Ra-226; la unidad actual es el Bequerelio equivalente a una desintegración por segundo.

$$1\ \text{Ci} = 3{,}7 \cdot 10^{10}\ \text{desintegraciones/s} = 3{,}7 \cdot 10^4\ \text{rutherford}$$

Desde el punto de vista de la radiación γ emitida por las sustancias radioactivas y también por los rayos-X, se define la unidad roentgen como la cantidad de radiación que ioniza 1 cm^3 de aire seco.

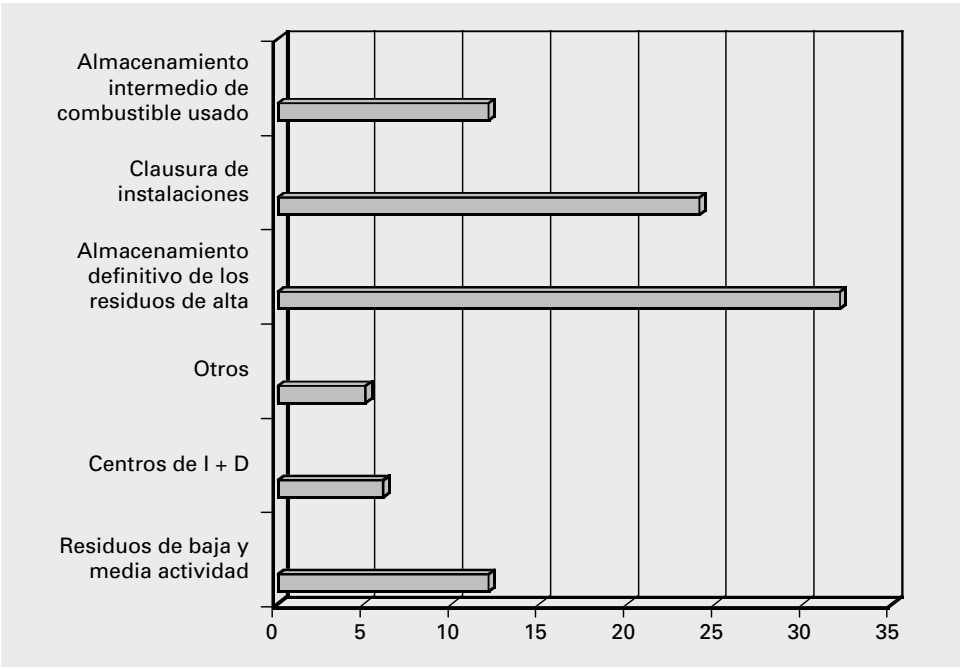


Figura 7.36. Origen de los residuos radioactivos.

Interacción de la radiación con la materia: Los fenómenos que producen las radiaciones dependen, en primer lugar, del individuo y en segundo lugar de la naturaleza de la propia radiación. Así, en el caso de las radiaciones α y/o β parte, o el total, de la energía sirve para excitar y/o ionizar átomos o moléculas.

La penetración de las partículas α, con una energía de 4 MeV, en el aire es de 3 cm mientras que en el agua es de algunas centésimas de milímetro. En cambio, las partículas β, con una energía similar, tiene una penetración de 15 m en el aire, 2 cm en el agua y 7 mm en el aluminio.

Las radiaciones de tipo electromagnético, rayos-X y rayos γ tienen una capacidad de penetración, a igualdad de energía, del orden de unas 10 veces superior a la que tienen las partículas β.

Dosis absorbida y dosis equivalente: La dosis absorbida es el valor medio de la energía generada por la radiación en la unidad de volumen y masa en el contenido.

Sin embargo, habida cuenta de la eficacia biológica a la que afecta la radiación, la dosis debe multiplicarse por un factor de calidad. En el campo de la contaminación por radiación es muy frecuente los efectos que produce el gas radioactivo radón que emana en muchas edificaciones. La unidad equivalente de dosis absorbida es el Sievert (Sv). El radón-222, perteneciente a la familia del uranio-238, y sus descendientes son los responsables de la mitad de la dosis personal (1,1 mSv). En la actualidad, las autoridades ambientales recomiendan limitar puntualmente la dosis anual a 1 mSv o bien a 20 mSv a lo largo de un año.

5.3.1. Producción de residuos de baja y media actividad en centrales

Una tonelada de combustible nuclear produce del orden de 100 m^3 de estos residuos. Así una planta del tamaño de 1.000 MW generará entre 200 y 500 m^3/año.

Los residuos radioactivos de media o baja actividad presentan menos de $4 \cdot 10^9$ Bq/t de actividad específica de partículas a y menos de $12 \cdot 10^9$ Bq/t de actividad específica en partículas β y γ. Entre estos márgenes se encuentran residuos de la industria nuclear: reprocesamiento, investigación, medicina, etc.

Residuos de alta actividad: Son los generados por el combustible de la propia central o bien por las actividades de reprocesamiento. Pueden llegar hasta 2.000 Ci/m^3. Una tonelada de combustible nuclear produce una media de 40 m^3 de estos residuos y puede considerarse que una central tipo de 1.000 MW genera cerca de 30 t anuales de combustible gastado.

5.3.2. Exposición a las radiaciones

La presencia de radiaciones ionizantes en el ambiente y lugares de trabajo puede producir daños en

las personas. En el lenguaje cotidiano, el término «riesgo» tiene diferentes acepciones. En el campo de la protección radiológica, la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) utiliza el término «riesgo» como la probabilidad de que se produzca un efecto perjudicial con la gravedad implícita que ello conlleva. Para los ciudadanos, los mas inmediatos proceden de:

- Radiodiagnóstico.
- Radioterapia: Irradiación externa y/o interna (fuentes encapsuladas).
- Medicina nuclear.

El radón, ^{222}Rn, es un isótopo formado por la cadena de desintegración del ^{238}U de especial incidencia ambiental. Debido a que se trata de un gas noble no forma enlaces y puede escapar libre y fácilmente desde su punto de generación hacia el exterior. Formado en rocas ricas en uranio, el ^{222}Rn con un tiempo de vida media de 3,82 días recorre distancias apreciables en este tiempo y logra introducirse en los cimientos de las edificaciones o en los manantiales y corrientes de agua.

La USEPA, en 1990, calculó que los ciudadanos americanos estaban sometidos a una dosis de radiación de 358 mrem (*mili roetgen-equivalent-man*), la mayoría: el 82% procedente de fuentes naturales (el gas radón representa el 55% del total). De las fuentes artificiales, el 11% corresponde a los Rayos X, el 4% a la medicina nuclear y el 3% a productos de consumo. Contra lo que habitualmente se piensa, la recarga de combustibles nucleares, los fallos en centrales, etc., sumados no llegan al 0,5%.

5.4. NATURALEZA DE LOS VIDRIOS PARA RESIDUOS RADIOACTIVOS

Las composiciones de los vidrios usados para el tratamiento de residuos radioactivos persiguen la estabilidad química para evitar, o limitar, la lixiviación y, sobre todo la resistencia al choque térmico.

Matrices vítreas: Las matrices vítreas que parecen ser las mejores candidatas para la vitrificación de residuos radioactivos son los vidrios de borosilicato y aluminioborosilicato. Presentan la ventaja adicional de fundir a temperaturas relativamente bajas y ofrecen una alta estabilidad química frente a las disoluciones iónicas en agua.

La opción francesa, en este campo, consiste en utilizar matrices de borosilicato. La adición de un 9% a un 20% de B_2O_3 a un vidrio de silicato mejora su resistencia a la lixiviación, reduce la temperatura de fusión y facilita la disolución en el vidrio de otros óxidos. Así la adición de TiO_2 reduce la volatilidad del isótopo radioactivo Cs_2O. Otros óxidos como los de Pb y Ag, a no ser que las condiciones de fusión sean muy oxidantes, son reducidos a su fase metálica y crean problemas de inmiscibilidad o volatilidad.

Las matrices de sílice tienen puntos de fusión más elevados, pero son mucho más resistentes a la lixiviación y presentan una mayor durabilidad. No obstante la solubilidad de óxidos radioactivos en estos vidrios es muy baja por lo que no son muy útiles para estos cometidos.

La Tabla 7.28 reproduce los análisis químicos de las composiciones más habitualmente usadas en la vitrificación de residuos de alta actividad. El tipo «La Hague» se emplea para la inertización de óxidos de uranio, mientras que el «Marcoule» se utiliza para aleaciones metálicas de uranio. En ambos casos, la temperatura de fusión es del orden de los 1.100 ℃ y el factor de reducción de volumen, a partir del sólido calcinado, es del 6%.

Tabla 7.28. Composición de vidrios para albergar residuos nucleares

Composición (%)	«La Hague»	«Marcoule»
SiO_2	45,5	42,2
Al_2O_3	4,9	10,0
B_2O_3	14,0	17,3
Fe_2O_3	2,9	1,8
Na_2O	9,9	17,3
MgO		5,4
NiO + Cr_2O_3	0,9	0,9
Oxd. (PF + Act.)	12,2	4,4

Los vidrios utilizados son adecuados para conservar su estabilidad para el confinamiento a largo plazo sometido a la acción de autorradiación (a,b, g y n) que produce una destrucción mecánica y el calor que lo acompaña.

Las últimas tendencias en el diseño de vidrios persiguen la desvitrificación controlada en origen y la formación de fases cristalinas altamente estables. Se toma como punto de referencia aquellas estructuras cristalinas que se tiene la certeza que son estables en la naturaleza desde hace millones de años, como los titanatos ($CaTiSiO_5$), las zirconolitas ($CaZrTi_2O_7$) o los circones ($ZrSiO_4$) y otras estructuras como el apatito que, en estado natural, contiene uranio.

En este punto vale hacer una mención al boro ya que es responsable de una serie de anomalías en las EDAR's. En la actualidad este elemento se emplea para la fabricación de lana de vidrio (el 28%), fibra de vidrio (12%), vidrio (9%), cerámicas (3%), detergentes (12%), aleaciones, etc. Es decir es un elemento muy usado y sus emisiones causan un sin fin de problemas. Por ahora pocas aplicaciones más que el intercambio iónico y la adsorción se han desarrollado, cuando está demostrado que es fundamental para la formulación de vidrios especiales como los citados anteriormente.

Comportamiento del vidrio a largo plazo: Cualquier tecnología que se desarrolle para confinar residuos nucleares, ya sean vidrios o técnicas convencionales, ha de ser sometida a un protocolo de ensayos que garantice el comportamiento del residuo durante un periodo muy largo, con frecuencia de miles de años.

En el caso de los vidrios existen tres sistemas que proporcionan información y entre ellos es posible extrapolar el comportamiento a largo plazo:

- *Análisis de los lixiviados*: el análisis, en función del tiempo, de los llamados elementos móviles poco retenidos en la película alterada permite estudiar la cinética de corrosión de la matriz. Como es evidente estos tests se llevan a cabo bajo condiciones estándar mucho más exigentes que los convencionales. Por ejemplo, con agua destilada a 100 ºC. Se admite que el agua desarrolla una reacción:

$$SiO_{2(vidrio)} + 2H_2O \rightarrow H_4SiO_4$$

La velocidad de disolución del vidrio permite analizar los fenómenos de transporte de isótopos radioactivos más móviles.

- *Pérdida de masa*: se trata de un ensayo comparativo, donde se evalúa el vidrio nuclear con respecto a otros vidrios idénticos. El ensayo analiza la pérdida de masa por elemento. Las futuras condiciones de almacenamiento de los vidrios nucleares crean una influencia mutua entre la propia estructura vítrea y la sílice contenida en la roca que alberga el residuo. Ello es debido a la llamada «bomba de sílice». Los ensayos demuestran que cuando se somete el vidrio junto a la roca a la lixiviación, existe una clara correlación entre la naturaleza del sílice y la lixiviación de B_2O_3 procedente del vidrio. Los minerales de arcilla que tienen tendencia a presentar mayor

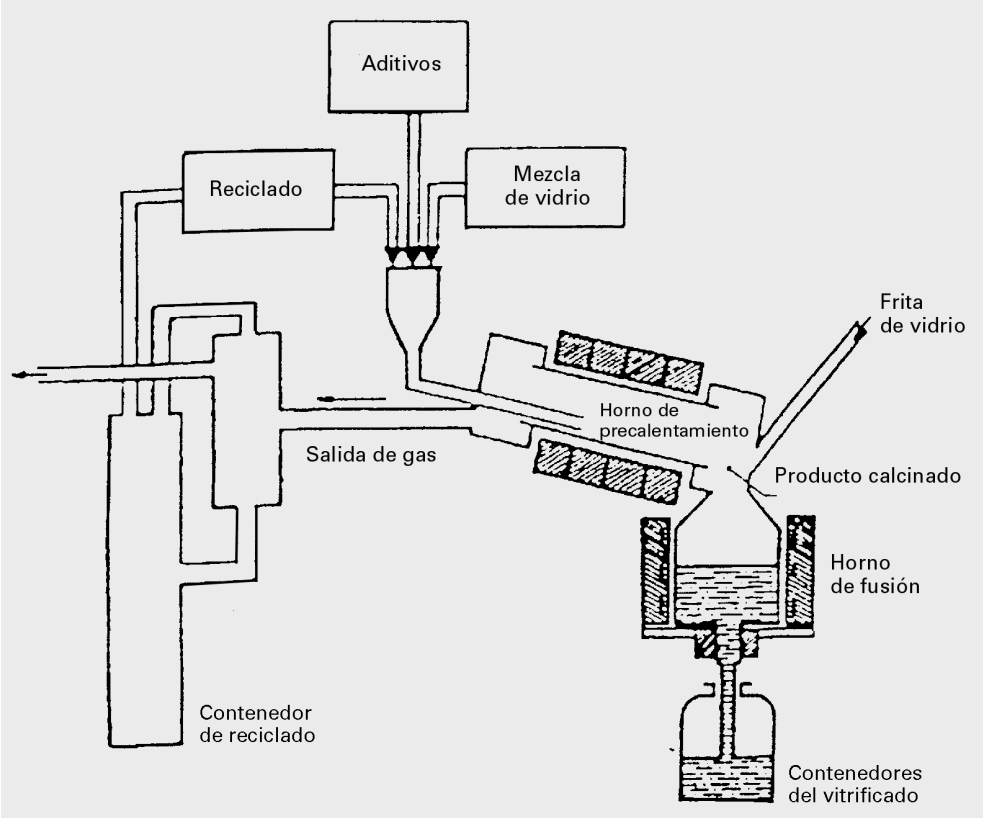


Figura 7.37. Vitrificación de residuos radioactivos.

fase amorfa (illitas, esmectitas, etc.) presentan una lixiviación muy superior a aquellas donde la sílice está en forma de cuarzo, muy bien cristalizada, o casi no existe (granito, arena, sal).

- *Análisis de la película alterada*: En el caso de los vidrios nucleares la parte alterada corresponde, en la gran mayoría de los casos, a la película superficial. Por tanto es perentorio analizar la composición de los elementos que componen la película superficial.

Los vidrios de fósforo funden a baja temperatura y disuelven los óxidos metálicos radioactivos con facilidad pero su resistencia a la lixiviación es reducida y, durante la fusión el vidrio ataca a los refractarios, hecho que encarece mucho los costes de mantenimiento.

5.5. LA GESTIÓN DE LOS RESIDUOS RADIACTIVOS DE ALTA ACTIVIDAD

La adecuada gestión de los residuos radiactivos (RR) debe garantizar que estos no alcancen la biosfera en condiciones tales que puedan dañar a los seres humanos y a su entorno.

En España, el volumen de RR a gestionar durante el periodo de vida de las centrales nucleares actualmente en operación será de unos 120.000 m^3 de los cuales 12.000 m^3 corresponden a residuos de alta actividad, constituidos principalmente por los elementos combustibles quemados en las centrales nucleares de agua ligera y por un reducido volumen resultante del reproceso de combustible.

En cuanto a los residuos de baja y media actividad, su volumen será de unos 200.000 m^3, producidos en su mayoría por el desmantelamiento de las centrales nucleares.

En el caso de los residuos de alta actividad, los de baja y media ya han sido comentados anteriormente, existen técnicas para el almacenamiento temporal en superficie, bien sea en seco o bajo agua. Sin embargo, la gestión definitiva, de momento y de acuerdo con el estado actual de la técnica, será el almacenamiento geológico profundo (AGP). Este tema se amplía en al final del Capítulo 14 de esta obra.

El concepto de AGP está basado en la interposición de múltiples barreras dispuestas en serie para garantizar el comportamiento adecuado del sistema en su globalidad, aun en el caso de que se produzca el fallo en alguna de ellas.

El contenedor de acero, en cuyo interior se ha depositado el residuo, se halla encapsulado en otro recipiente de bentonita la cual, a su vez está insertada en el terreno adecuado (medio hospedante) a mucha profundidad.

A medida que el agua llegue a la cápsula, ésta se irá corroyendo (se estiman necesarios 3.000 años para el acero y decenas de miles en el caso de que la cápsula sea de cobre). A partir de este momento el agua ira disolviendo el combustible y se inicia la lixiviación. Los radionúcleos disueltos intentarán atravesar la barrera de bentonita por un mecanismo de difusión. Se supone que este proceso, puede extenderse por centenares de miles de años, para la mayoría de radionúcleos críticos.

Desde el punto de vista de su almacenamiento definitivo se consideran principalmente dos tipos de residuos:

- Los de baja y media actividad.
- Los de alta actividad.

La Tabla 7.29 expone las principales características.

Según un reciente estudio aparecido en la revista *Nature*, firmado por la Universidad de Cambridge (Reino Unido) en 2006, la seguridad que este tipo de procedimiento se creía seguro para un mínimo de 1.500 años, se demuestra que deja de ser efectiva a los dos siglos. Teniendo en cuenta que radionúcleos como el ^{239}Pu emiten radioactividad letal durante 24.000 años, es evidente que es preciso ahondar en nuevas vías de tratamiento. La trasmutación nuclear parece una de las más prometedoras.

Tabla 7.29. Características de los residuos nucleares atendiendo a su almacenamiento

Características	Residuos media y baja actividad	Residuos alta actividad
Período de semidesintegración	No debe ser superior a 30 años.	Casi siempre superior a 30 años.
Actividad específica por elemento	Baja, no supera ciertos valores establecidos para esta categoría.	Alta, supera los valores establecidos para la categoría anterior.
Calor	No desprenden.	Pueden desprender calor.
Tipo de emisores	Beta, gamma y alfa < 0,37 GBq/T	Beta, gamma y alfa > 0,37 GBq/T
Blindaje	No hace falta que sean muy potentes.	Necesitan blindajes potentes.

6. Aspectos energéticos de la vitrificación

Desde el punto de vista fisicoquímico, en la vitrificación es preciso alcanzar una elevada temperatura para romper enlaces y desestabilizar el elemento más débil que hará las funciones de fundente. Una vez líquido, éste atacará al siguiente hasta hacer lo mismo con el formador de vidrio, que habitualmente suele ser el SiO_2. La operación será tanto más fácil cuanto más fundentes se hallen presentes o bien se introduzca una parte de cascote vidrio, material de naturaleza vítrea, en la formulación puesto que el ataque del líquido es mucho más efectivo que el de un sólido. De ahí arranca la ventaja de usar residuos para la formulación de vitrificados.

La Tabla 7.30 muestra para los diversos tipos de vidrio comerciales que se fabrican unos datos de consumo específico, según la producción.

De la tabla anterior hay que resaltar dos factores importantes:

- Los consumos específicos, aunque se trate de hornos de elevadas producciones, son importantes.
- Los datos expuestos representan consumos mejorados puesto que son valores referidos a hornos que reciclan una cantidad importante de cascote: 70% en el caso del vidrio hueco, 20% en el vidrio plano y 40% en el caso de pantallas de TV y objetos de mesa (vasos y platos).

6.1. ESTRUCTURA DEL BALANCE TÉRMICO DE UN VITRIFICADOR

La gran mayoría de las reacciones que tienen lugar durante la fusión absorben o ceden calor en muy pequeñas cantidades. O en el caso de hacerlo, como la descomposición de la caliza en OCa y CO_2 el calor absorbido es casi despreciable en el conjunto del balance térmico. Otro factor importante es la absorción de calor asociada a la formación de vidrios.

Todo ello significa que para acelerar, o conseguir las reacciones de formación de vidrio es preciso alcanzar temperaturas muy elevadas y ello supone un consumo importante de energía. Normalmente tampoco es suficiente alcanzar la temperatura de fusión ya que el líquido fundido, el vitrificado, debe evacuarse por la parte inferior del horno y al ceder algo de calor durante la salida, el descenso de temperatura provoca un aumento importante de la viscosidad e impide el colado. En otras palabras. A la masa ya fundida de vidrio, hay que acoplarle un quemador de forma que el aumento de temperatura favorezca la colada por disminución de la viscosidad provocada por el puntual aumento de la temperatura.

La Tabla 7.31 muestra los parámetros básicos de partida que servirán para analizar los consumos de los hornos de vitrificación, así como las variables más importantes que afectan al consumo.

Tabla 7.31. Parámetros de funcionamiento de un horno de vitrificación

DATOS PARTIDA PARA BALANCE		
Producción	1.000	kg/h
Temperatura	1.350	°C
Exceso de aire	1,10	
Cantidad de SiO_2	54%	
Consumo especifico	2.101	th/h

El consumo indicado (2.101 th/kg), que equivale a 2,44 kwh/kg de material fundido, es sensiblemente superior a los datos indicados en los tipos de hornos de gran tamaño. Ello es lógico porque se trata de

Tabla 7.30. Consumos específicos según producción y clase de vidrio

Tipo de vidrio	Tipo de horno	t/día	Kwh/kg vidrio
V. hueco	Balsa con aire precalentado (sistema regenerativo)	40-500	1,16
V. hueco	Horno recuperativo (aire precalentado)	40-450	1,38
V. plano	Balsa con aire precalentado (sistema regenerativo)	150-900	1,75
V. especial pantallas de TV	Balsa con aire precalentado (sistema regenerativo)	100-500	2,30
Vasos, platos	Horno recuperativo (aire precalentado)	15-120	1,86
Fibra vidrio	Horno recuperativo (aire precalentado)	30-350	1,19

hornos especiales de pequeñas producciones (24 t/día).

Un horno de vitrificación, como todos los hornos de vidrio y la gran mayoría de hornos de proceso que trabajan a alta temperatura funcionan ininterrumpidamente todo el año las 24 horas del día, con lo que no es necesario tener en cuenta la energía precisa para la puesta en marcha. Por otro lado este régimen de trabajo permite estabilizar las pérdidas de calor a través de las paredes y la instalación de un recuperador de calor. La Tabla 7.32 muestra la estructura básica del balance térmico de este horno.

Tabla 7.32. Estructura básica del balance térmico de un horno de vitrificación de gas

Balance térmico	kcal/h	%
Perdidas fusión	321.850	15,3%
Material caliente salida	319.200	15,2%
Perdidas paredes	177.236	8,4%
Parcial	818.286	
Gases a la salida	1.282.944	61,1%
Total	2.101.230	100,0%

Para comprender mejor la importancia de cada uno de los apartados que integran el balance térmico, en los epígrafes siguientes se explican los pormenores de cada uno de ellos.

6.1.1. Las pérdidas por fusión

Llamadas también de reacción, o calor de fusión. Se trata de una partida compleja y difícil de valorar que depende de:

- Componentes químicos y minerales que intervienen en la composición del vitrificado. Así, si la cantidad de carbonatos es importante el calor de reacción también lo será. Un indicativo importante es la cantidad de sílice presente, ya sea en forma de cuarzo, lo habitual, o procedente de otros silicatos (feldespato, caolín, etc.).
- Temperatura y tiempo de residencia del vidrio. Según sea la temperatura de trabajo se forman unas estructuras silicatadas que absorberán mas o menos calor. De forma indirecta también influye la distribución granulométrica de la materia prima.

6.1.2. Materias primas y consumo. Uso de residuos en la fusión

La industria del vidrio fue, junto con la metalúrgica, una de las primeras en emplear residuos para la fabricación. Existen muchos residuos que facilitan la fusión con lo que la temperatura de trabajo es menor. En esta tesitura existen dos ahorros: el de materia prima y el de energía.

Los materiales alternativos más empleados son:

- Cascote, procedente de la propia fabricación. Como tiene idéntica composición no hay que prever ninguna precaución especial.
- Cascote o residuo postconsumo. Procedente de la recogida selectiva de los residuos urbanos. La calidad es muy variable. Hay que tener precaución con los vidrios de colores y los impropios presentes (bombillas, cerámicas, etc.).
- Escorias. Hay de muchas clases. Normalmente se debe proceder a una reducción de tamaño hasta lograr una homologación con las materias primas que se emplean.

6.1.3. Material caliente a la salida

También denominado calor sensible a la salida. El fundido sale del horno a la misma temperatura que el baño y éste calor se pierde. La Figura 7.38 muestra la caída de material fundido de un horno de vitrificar.

Figura 7.38. Salida de material fundido del horno de vitrificar.

Desde el punto de vista del ahorro energético en la gran mayoría de los casos no se puede hacer nada para mitigar estas pérdidas de calor. Por ejemplo en la fabricación de vidrio soplado o en la producción de baldosas es preceptivo que el fundido salga caliente. En cambio en la fabricación de fritas cerámicas hay que dejarlo caer sobre agua para poder ensacarlo.

No obstante hay otras aplicaciones en que es posible el aprovechamiento del calor sensible. Se trata de la escoria generada en muchos hornos de fundición, por ejemplo de cobre.

En cualquier caso hay que dejar bien claro que si bien es factible recuperar el calor sensible, de cara al consumo del horno ello no afecta para nada al consumo de combustible.

6.1.4. Las pérdidas a través de las paredes

A diferencia de las dos partidas anteriores: calor de fusión y calor sensible del material a la salida, las pérdidas de calor a través de las paredes constituyen una partida cuya disminución es factible y además afectaría directamente al consumo del horno.

El valor de estas pérdidas suele oscilar entre el 4 y el 10% del total según se trate de un horno grande o pequeño y, naturalmente si esta bien o mal aislado.

El problema del aislamiento térmico tiene, obviamente, sus límites. Si se aumenta mucho el espesor de la pared, ésta se torna muy buen aislante, las pérdidas de calor se reducen pero el coste de instalación aumenta. Además acontece que cuando se ha de trabajar a alta temperatura un aislamiento tan bueno supone un aumento de la temperatura en la cara fría de los materiales que componen las capas intermedias, lo cual trae consigo consecuencias a largo plazo sobre la vida de los materiales.

6.1.5. El calor sensible de los gases

Los gases salen del horno de vitrificación a elevada temperatura. De hecho esta partida constituye, con diferencia el principal epígrafe del balance térmico. Este calor se puede recuperar en una caldera de recuperación donde se genera vapor de agua y éste expandirlo en una turbina de vapor acoplada a un alternador para producir electricidad.

No obstante en casos de una producción reducida, son aconsejables otras medidas de ahorro energético. Parte del calor puede usarse para precalentar el aire de combustión del quemador principal, para calentar baños o bien como fuente de energía para secar lodos después de la deshidratación.

En los hornos de vidrio lo más habitual es usar este calor para precalentar el aire de combustión. La Tabla 7.33 muestra el ahorro de combustible teórico que se obtiene con el precalentamiento del aire de combustión a partir de los datos que aparecen en la propia tabla.

Tabla 7.33. Ahorro de energía por precalentamiento del aire de combustión

AHORRO DE ENERGÍA POR PRECALENTAMIENTO AIRE		
Temperatura salida de gases	1.350	°C
% De recuperación de calor	45%	
Calor recuperado	577.325	kcal/h
Consumo total	1.523.905	kcal/h
Consumo especifico	1,77	kw · h/kg
°C Teórica de calentamiento	687	°C

La Figura 7.39 muestra el esquema de la recuperación del calor sensible de los gases a base de generar vapor de agua y expandirlo en una turbina.

El ahorro es muy importante. Sin embargo antes de intentar aprovechar el calor, lo más sensato es evitar generarlo. Esto es, reducir el consumo de energía en origen. Este depende de:

- *La temperatura.* Este parámetro no puede cambiarse ya que depende de la formulación del vidrio. Sin embargo dada la importancia que tiene, la Figura 7.40 reproduce, con los parámetros de la Tabla 7.33, la evolución del consumo específico en función de la temperatura.

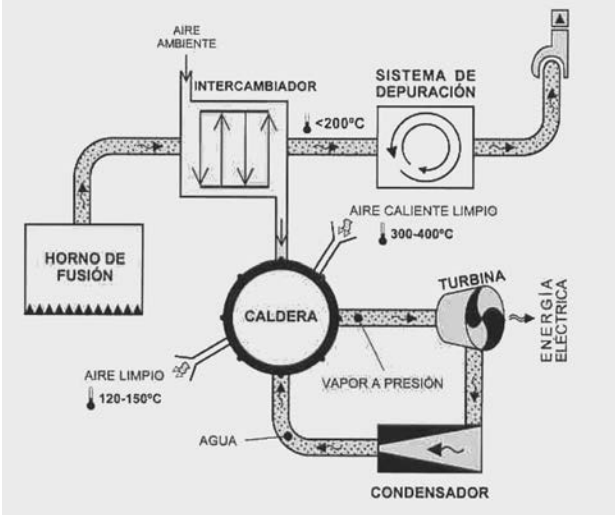


Figura 7.39. Recuperación de calor con generación de electricidad en hornos de fusión.

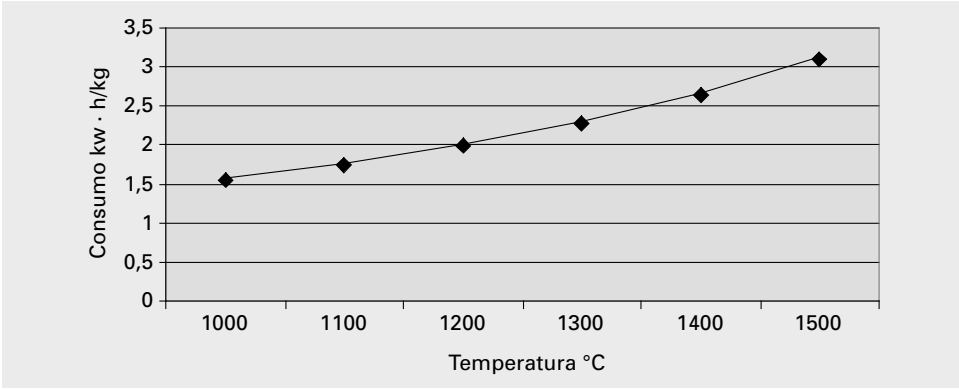


Figura 7.40. Aumento del consumo con la temperatura de fusión.

- *Del exceso de aire.* Este es otro factor importantísimo. En principio debería trabajarse con excesos de aire nulos (EA = 0). Sin embargo, en la práctica ello es irrealizable, ya que en este rango de temperaturas y nula presencia de oxígeno en los gases de combustión, la posibilidad de generar mucho CO es elevadísima y lo que se ganaría por un lado (poca masa de gases) se perdería por otra (inquemados). La gráfica de la Figura 7.41, muestra para los parámetros de la Tabla 7.33 la evolución del consumo específico en función del exceso de aire.

- *El enriquecimiento en oxígeno.* Teniendo en cuenta que en términos de volumen el porcentaje de oxígeno en el aire es el 21% y en peso es el 23%, el resto, o sea la mayoría, es nitrógeno, gas inerte en el que se va a gastar energía para calentar. Además generará NO_x.

La Figura 7.42 muestra la evolución del consumo energético según la cantidad de oxígeno (% en peso) presente en el aire de combustión. El resto de los parámetros se mantienen constantes para poder llevar a cabo comparaciones. (EA = 10% y 1.350 ℃ de temperatura de trabajo).

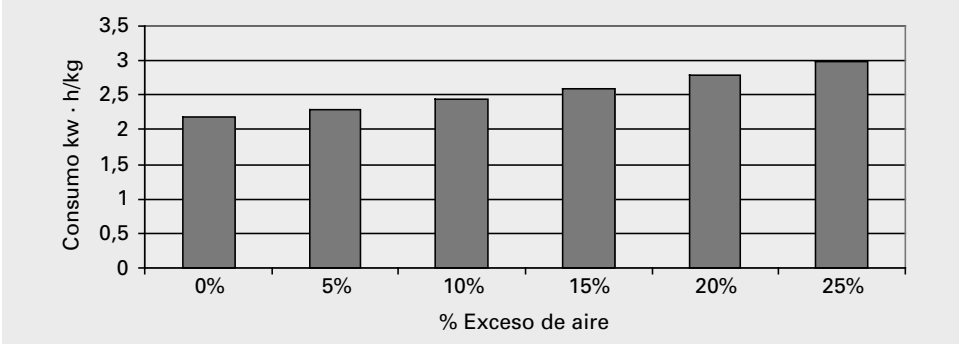


Figura 7.41. Aumento del consumo con el exceso de aire.

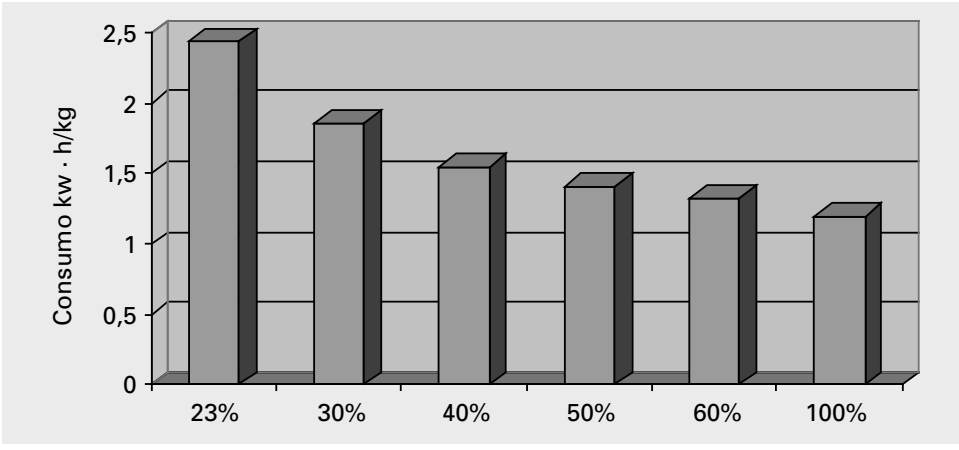


Figura 7.42. Disminución del consumo especifico con la cantidad de O_2 en el aire.

La Figura precedente plantea dos valores extremos. En el caso del 23% de O_2, aire ambiente, es el caso en que trabajan la inmensa mayoría de los hornos. Entre éste valor y la ausencia de nitrógeno (100% de O_2, aunque en la práctica éste valor rebasa escasamente el 90%) la denominada oxicombustión (*Oxy-Fuel Melting*), hay toda una gama de posibilidades que naturalmente tienen que ver con el precio del oxígeno.

Además, para trabajar solo con oxígeno se deben usar unos quemadores especiales.

6.2. COMPARACIÓN DE SISTEMAS DE VITRIFICACIÓN

Atendiendo estrictamente a razones de índole de consumo energético, la Tabla 7.34, deja bien claro que el sistema a usar debe ser el eléctrico. Sin embargo una decisión de este tipo no se toma solamente a la luz del consumo específico de energía. En la tesitura de una región donde el gas natural sea barato, y la electricidad cara, es difícil resistirse a la tentación de no usar el sistema convencional de horno abierto.

El enriquecimiento con oxígeno cada día se usa mas, al menos en la proporción de que el coste del oxígeno consiga reducir el precio de compra del combustible.

Tabla 7.34. Comparación de consumos específicos en sistemas de vitrificación

Sistema	Consumo kw · h/kg
Eléctrico	0,77
Convencional gas	2,44
Enriquecimiento $\%O_2$ = 35%	1,67
1.350 °C. EA 1,1	

En la tabla precedente hay que indicar que, en el caso de la fusión convencional el exceso de aire es del 10%. Con el propósito de que los valores del ejemplo sean comparables entre ellos, todos los hornos del ejemplo hacen la misma producción a la misma temperatura.

De acuerdo con los resultados parece lógico deducir que, desde el punto de vista del consumo específico, el sistema eléctrico será el más ventajoso. Sin embargo hay que valorar otros parámetros como:

- Precios de la electricidad y del gas.
- Calidad del vidrio producido (casi siempre favorable a la fusión eléctrica).
- Aspectos ambientales (siempre favorables a la fusión eléctrica).

7. Aspectos ambientales de la vitrificación

No solo hay que regirse por los parámetros de consumo energético para decidir la elección de un tipo de horno de vitrificar. Las leyes de protección del medio ambiente son cada día mas estrictas, sobre todo cuando tienen que ver con una planta de tratamiento de residuos, como es el caso de la mayoría de los ejemplos que se citarán posteriormente.

La Tabla 7.35 muestra un resumen de los potenciales contaminantes que se generan en los hornos de fusión convencionales. En esta tabla resumen, se indica la fuente normal de la contaminación.

En último lugar aparece el CO_2 que hasta hace bien poco tiempo nadie lo incluía en una relación de contaminantes. En el caso de la fusión del vidrio la cantidad de este gas es muy importante básicamente debido al uso de combustibles fósiles y al empleo de carbonatos lo que incrementa la cantidad de gases de efecto invernadero, de ahí la importancia de pensar en sistemas combinados como la fusión eléctrica de residuos a partir de electricidad generada a su vez por la incineración o gasificación de residuos.

Los hornos de fusión convencionales de vitrificados y fritas por combustión presentan un destacado foco emisor: la chimenea. Los gases de emisión están constituidos por los típicos de un proceso de combustión (CO_2, H_2O y aire), substancias procedentes de la descomposición de las partes más volátiles de las materias primas, polvo arrastrado y otros contaminantes.

La Tabla 7.36, extraída de la literatura, muestra la relación de contaminantes encontrados en diversos hornos de fritar, en mg/Nm^3, referidos al 11% de O_2, puesto que este valor suele ser el más empleado para referir la concentración de contaminantes.

La columna de la izquierda de la tabla anterior muestra diversos valores medios de contaminantes hallados en hornos de fritar de la zona de Catellón (España), mientras que las dos columnas centrales indican los límites existentes en la zona de la Emilia

Tabla 7.35. Potenciales contaminantes en la vitrificación

Contaminante	Fuente
Material particulado	Condensación de volátiles de la materia prima. Impropios en la materia prima. Productos de la combustión de los combustibles fósiles.
NOx	De origen térmico debido a las altas temperaturas. Descomposición nitratos de las materias primas. Oxidación del N contenido en los combustibles.
SOx	Azufre en el combustible. Descomposición sulfatos/sulfuros de las materias primas. Oxidación del H2S generado en reacciones internas.
HCl	Debido a impurezas en la materia prima. En vidrios especiales se usa el ClNa como materia prima.
HF	Debido a impurezas en la materia prima. Añadido como materia prima para acabados o fundente (fritas, filamento, opalescentes, etc.)
Metales: V, Ni, Pb, Cd, Se, Cr, Sb, As, etc.	Debido a impurezas en la materia prima y combustibles. Añadido como materia prima para colorantes (fritas, vidrios coloreados, etc.). Vidrios especiales (Pb en vidrio de plomo)
CO	Malas combustiones.
H_2S	Condiciones reductoras en presencia de azufre.
CO_2	Producto de la combustión. Descomposición de carbonatos de las materias primas.

(Italia) y los límites presumiblemente que se impondrán en un próximo futuro. La última columna, contaminantes a abatir, corresponde a la diferencia entre lo existente y los límites previsibles.

Antes de entrar en la discusión pormenorizada de la emisión de contaminantes en los hornos de fusión convencionales, vale la pena resaltar lo siguiente:

- Los valores medios extraídos de la literatura especializada, son muy elevados, en particular los referentes al material particulado (MP).
- Los valores mínimos de F o de Cl corresponden a aquellas fórmulas en que estos elementos no están presentes. O en otras palabras, su presencia es casi inevitable. Los valores de B son elevados.
- Los valores de NO_x son elevadísimos. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud, los límites máximos aconsejados para este compuesto son de 200 mg/Nm^3 como valor límite durante una hora de exposición (Directiva 1999/30/CE).

Tabla 7.36. Valores medios de contaminantes atmosféricos y límites

CONTAMINANTES EMITIDOS				
	Medio	**Límite Italia**	**Limite esperado**	**A abatir**
MP	2.608,3	50,0	50,0	2.558,3
HF	8,3	8,3	8,0	0,3
B_2O_3	208,0	83,3	80,0	128,0
HCl	83,3		30,0	53,3
NO_x	1.796,9	1.666,7	1.000,0	796,9
CO	218,8		100,0	118,8
Metales	15,0		5,0	10,0

Valores en mg/Nm^3
Valores referidos al 11% de O_2

- Es de resaltar la presencia de CO, a pesar que este contaminante no debería estar presente.
- En la relación no aparece la diferenciación de los diversos metales pesados, sino una suma de ellos.

Las ventajas ambientales que aporta la fusión eléctrica, tanto para la fusión del vidrio como especialmente de las fritas, son muchas. Las más destacables son las indicadas en los apartados siguientes.

7.1. EMISIONES DE NO_x

Como se ha visto en el ejemplo expuesto en la Tabla 7.36 el principal problema ambiental de los hornos de fusión son los NO_x, puesto que a diferencia del material particulado estos son mucho más difíciles de abatir.

En los hornos convencionales de gas para alcanzar elevadas temperaturas es preciso trabajar con aire enriquecido con oxígeno. La Tabla 7.37 expone los análisis de gases de combustión en un horno de fritar convencional a gas usando aire como comburente.

Tabla 7.37. Análisis de gases de combustión

ANÁLISIS DE GASES DE COMBUSTIÓN		
	Gases húmedos	**Gases secos**
CO_2	8,8%	10,6%
H_2O	16,9%	0,0%
N_2	72,6%	87,3%
O_2	1,7%	2,1%
Total	100,0%	100,0%

Porcentajes en volumen.

En el caso de usar aire enriquecido y pese a la carencia en términos relativos de nitrógeno (trabajar con un 35% de oxígeno supone un 60% de nitrógeno en los gases de salida) la cantidad de NO_x de origen térmico generado es muy importante. La generación de los NO_x arrancan por reacción directa entre el nitrógeno del aire y el oxígeno según:

$$N_2 + O_2 \rightarrow 2\ NO$$

La ruta cinética de formación se inicia con la disociación de la molécula de oxígeno (O_2), que posteriormente reacciona con las moléculas de nitrógeno, empezando así una reacción en cadena. La energía de activación de ésta reacción es muy alta y ello explica que la reacción tenga una fuerte dependencia de la temperatura.

La cinética de formación está regida por la expresión:

$$NO_x = A \cdot \exp^{(-B/T)} \cdot N_2 \cdot (O_2)^{0,5} \cdot t$$

Donde A y B son constantes, T es la temperatura de la llama y t el tiempo de residencia de los gases a esta temperatura.

La generación de NOx comienza a ser significativa a partir de 1.250 ℃. La Tabla 7.38, muestra la clara correlación existente entre la temperatura de trabajo y la generación de NO_x de origen térmico.

Tabla 7.38. Correlación entre la temperatura y la generación de NO_x

Emisión (mg/Nm³)	°C	NO_x
Ladrillos	1.000	—
Bizcocho	1.060	41
Monoporosa pasta roja	1.080	78
Monococción pasta roja	1.150	94
Monococción pasta blanca	1.170	88
Gres porcelánico	1.200	160
Frita	1.350	800
Vidrio	1.500	< 2.000

La formación de NO_x en el proceso de combustión se ve favorecida por:

- La elevada temperatura de llama. En la fusión por combustión de gas natural, es evidente que si la temperatura del baño ha de ser de 1.500 ℃, la llama debe estar por encima de esta temperatura.
- Alta concentración de oxígeno y nitrógeno en la zona de mayor temperatura de la llama.
- Elevado tiempo de residencia de los gases a altas temperaturas. Este factor está garantizado, ya que en los hornos convencionales el tiempo de residencia es muy alto.

En los hornos de combustión el tratamiento de eliminación de los óxidos de nitrógeno conlleva un problema adicional. Aproximadamente el 90% de los NO_x, es NO (insoluble en agua) y el resto es NO_2. Para oxidar el NO y poder tratarlo por vía húmeda es preciso un exceso de oxígeno, lo que repercute en el consumo específico del horno.

Las inminentes legislaciones obligarán a la reducción de los óxidos de nitrógeno a valores que estarán sobre los 200 mg/Nm³. Para solventar el problema la solución mas eficaz es la adición de NH_3, o de urea, a la corriente de gases cuando estos se encuentran a unos 900 ℃.

Los combustibles convencionales, en particular los gases combustibles, no suelen contener nitrógeno. Pero cuando se halla en el combustible la energía creada en la combustión vaporiza el elemento y genera grupos cianuro (HCN) y, con menor frecuencia, aminas (preferentemente NH_3).

Es obvio que en los hornos eléctricos la emisión de NO_x de origen térmico es nulo.

7.1.1 El NO_x procedente de las materias primas

Con frecuencia se usan nitratos en la formulación de los vitrificados ya sea como agente oxidante, como producto para el afino o, simplemente como materia prima. Lo normal es usar nitratos de Na y K, pero también son frecuentes los de Ba. Por ejemplo, los nitratos son ampliamente usados en la fabricación de vidrios especiales para vidrios de pantallas de TV, borosilicatos, fritas cerámicas y vidrios ópticos.

Composiciones habituales emplean del 0,5 al 1%, o sea de 5 a 10 kg de $NaNO_3$ por tonelada de fundido, valor que puede alcanzar el 4% en vidrios de pantallas de TV. En teoría por cada 1% de nitrato introducido en la formulación dará lugar a 4,5 kg de NO_x por tonelada de vidrio. Este valor equivale aproximadamente a 2.800 mg de NO_x/Nm³ de gases medidos al 8% de O_2

Con la temperatura el nitrato se descompone. El oxido metálico pasa a formar parte de los «fundentes», parte del oxígeno se emplea para oxidar los metales presentes y el nitrógeno pasa a NO y NO_2.

7.2. EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO

La naturaleza de las emisiones en los hornos de vidrio varía de acuerdo con los diferentes procesos pero depende, fundamentalmente del tipo de horno y su forma de explotación, así como de la composición del fundido. La caracterización de polvos de filtro de instalaciones de fabricación de fritas cerámicas (de hecho muy semejantes a los hornos de fusión de vidrio botella y plano pone de manifiesto una pequeña parte de material refractario (sílice, alúmina) y un mayor contenido de elementos más fundentes (boro y alcalinos), compuestos que se han emitido por volatilización a partir del fundido. Cuando se usa boro, en el caso de los hornos abiertos convencionales, la cantidad emitida es elevada (en los polvos de filtro puede alcanzar el 17%) y, una parte del mismo se halla presente en el residuo en forma cristalina, habiendo formado un borato sódico cálcico.

Las principales causas de las emisiones son:

- Volatilización y reacción de sustancias entre la carga (crudo) y el material fundido. Algunos compuestos volátiles pueden condensar a menor temperatura y ser emitidos como materia particulada.
- El ejemplo más representativo de volatilización tiene lugar cuando el óxido de sodio fundido en el silicato reacciona con el vapor de agua según:

$$Na_2O \text{ (fundido)} + H_2O \rightarrow 2\ NaOH \text{ (gas)}$$

- Metales e impurezas en el combustible. Las emisiones debidas al combustible pueden superar el 90% del material particulado.

El mecanismo de emisión no está estudiado con profundidad. En el caso de los hornos de fusión de vidrio sodocálcicos, la mayoría de las partículas corresponden a sales solubles, en especial sulfato sódico, mientras que la fracción insoluble contiene básicamente sílice y metales (Al, Fe, Cr, etc.). El rango de las partículas oscila entre 0,02 y 1 μm.

La toxicidad del material particulado depende por lo general más del tamaño de la partícula que de la naturaleza intrínseca del contaminante presente. Por esto en muchas legislaciones hacen distinción entre el material particulado mayor o menor de 10 micras. Las partículas de tamaño inferior a 1 μm son especialmente nocivas para la salud humana.

Las emisiones por encima las 5 mm son filtradas por la laringe, las de intervalo comprendido entre 5 y 0,5 mm son interceptadas por los cilios de los bronquios y bronquíolos, por eso las de tamaño menor son las realmente peligrosas para la salud al ingresar directamente en los alvéolos pulmonares donde pueden generar agentes que se combinen con las macromoléculas nucleofílas, desencadenando procesos de degradación celular, tales como el enfisema o el cáncer.

Las partículas sólidas sedimentables (tamaño inferior a la micra, para la mayoría de los autores) se depositan sobre las partes aéreas de los vegetales. Estas partículas pueden ser:

- *Inertes:* como la sílice, sales neutras, óxidos de Ca, Al, Fe, y diferentes minerales como la arcilla. Si bien se trata de material inerte y no produce efectos directos de contaminación, si los puede causar indirectos ya que la acumulación de material en la superficie de la hoja impide la acción clorofílica.
- *Sales solubles.* Se depositan y cuando la humedad ambiente o el agua de lluvia las redisuelve pueden atacar químicamente el tejido vegetal.
- *Metales pesados.* Son básicamente insolubles y pueden actuar de dos maneras. De forma indirecta por obturación de los estomas o sobre la función clorofílica o de forma directa tras su asimilación como nutrientes. El Pb, Cu, Se y Sn son algunos de los ejemplos más representativos.
- *Volátiles.* En el caso de material particulado se hace referencia a la emisión de metales con puntos de volatización bajos como el Pb, As y B, que producen efectos negativos sobre los cultivos, y son frecuentes en los hornos de fritar. Estos metales, al final, acaban condensándose en forma sólida.

Aunque con frecuencia se denominen polvos «inertes» esto no deja de ser un eufemismo, ya que no hay ninguna clase de partícula que no provoque alguna respuesta celular en el pulmón cuando se inhala en cantidad suficiente. Por esta razón la mayoría de las legislaciones fijan un tope de 10 mg/m^3 de polvo total, siempre que contenga menos de 1% de cuarzo y no contenga amianto.

La caracterización del polvo de los hornos de fritar denota que tiene un análisis químico semejante a la propia frita fabricada pero enriquecido por los elementos más volátiles, entre los que cabe destacar los compuestos de boro o algunos metales pesados.

En el caso de los hornos de fusión en general y de fritar en particular, el material particulado constituye uno de los problemas mas importantes. Las causas principales de su emisión son:

- Disparidad en los puntos de fusión de las diversas materias que componen la fórmula. Ello supone que algunos materiales volatilicen o sean simplemente arrastrados por la corriente de fluido. Este fenómeno es bien patente en los hornos de fritar ya que parte de este material condensa en la chimenea y obliga a parar el horno al cabo de unos meses para su limpieza.
- Los materiales que componen la fórmula de carga deben entrar en el horno con un tamaño de partícula muy pequeño. Ello favorece el arrastre de partículas ya desde el inicio. En los hornos con comburente enriquecido con oxígeno la masa de gases sigue siendo importante y las velocidades en la superficie del baño son superiores a los 2 m/s, suficiente para provocar el arrastre. Además este fenómeno se ve favorecido por el efecto ascendente de la corriente (los gases calientes deflectan hacia la parte superior de la bóveda, lo que aleja a las partículas de la superficie del baño).

Respecto al material particulado en suspensión los análisis muestran claramente la presencia de metales pesados usados en las formulaciones de las fritas o en la de colorantes como Zr, Cu, Ce, Pb, Co o As.

Es obvio que en la fusión eléctrica no acontece ninguno de estos fenómenos. En la parte donde cae el material (alimentación) no existe corriente de aire alguna. Así, todo el material que entra acaba cayendo dentro de la capa que recubre la superficie del baño, con independencia de su punto de volatilización.

Finalmente hay que añadir que los resultados de los análisis químicos llevados a cabo sobre los polvos de filtro ponen de manifiesto que el material emitido tiene un alto valor económico (del orden de 0,2-0,3 €/kg), por lo que resulta imprescindible su reciclado.

7.2.1. Causas del arrastre de material particulado

En los hornos de vidrio o de fritar la fusión de las materias primas no se produce a la vez puesto que presentan puntos de fusión muy dispares, y aquellas que tienen punto de fusión bajo, como los boratos o los carbonatos, generan fase líquida a baja temperatura, que acelera la fusión de los otros minerales.

En el caso de los hornos de vidrio y de frita convencionales, hornos donde la emisión de partículas es más intensa, la velocidad de calentamiento de la carga es muy elevada (el material frío se echa directamente sobre el baño fundido que con frecuencia se hallan por encima los 1.400 ℃). El agua presente en los componentes, ya sea de humedad o de composición cristalográfica, se vaporizará instantáneamente y saldrá violentamente del baño arrastrando partículas finas en su flujo. Mientras las partículas se hallen en la superficie del baño pueden ser incorporadas a la corriente de gases de combustión.

Otros minerales cuando se calientan desarrollan una porosidad interna con microporos y pequeñas fisuras dispersas en la estructura cristalina. Su expansión térmica conduce a tensiones internas en los cristales individuales, provocando su rotura en fragmentos menores. Este fenómeno se denomina crepitación, y aunque siendo más frecuente en los hornos de fusión, también se produce en la cerámica convencional. La crepitación se ve favorecida con el empleo de materias primas con un tamaño de grano importante. Los gases ocluidos en el interior aumentan de volumen con la temperatura y al final, rompen el cristal y son expulsados violentamente junto al material arrastrado.

Otras causas de generación de material particulado, se deben a la emisión de gases que, en su flujo arrastran determinadas partículas. Los más importantes son:

- Generación y evolución de gases producto de la descomposición de carbonatos, como el CO_2. Los de calcio se descomponen alrededor de los 800 ℃. Si se alcanza esta temperatura de forma súbita, el gas puede arrastrar partículas.
- Reacciones químicas entre componentes que integran la formulación.
- Polvo en la mezcla alimentada. Este suele ser uno de los fenómenos más corrientes. Si el material no se halla bien compactado, o ha sido sometido a golpes, durante los movimientos de expansión que experimenta el material debido a las fases de calentamiento, se emiten partículas.
- Flujo de gases de combustión. Este suele ser el vehículo de transporte del contaminante donde la velocidad de la corriente de gases es más elevada. Caso particular pueden ser aquellas partes de los hornos donde la alimentación se halla precisamente al lado del quemador principal.

Entre la emisión de material de naturaleza vítrea destaca una gran cantidad de producto de morfología esférica, de tamaño siempre inferior a las 10 mm. Poseen una textura superficial aparentemente lisa, surcada en la mayor parte de los casos por una finísima red de pequeñas fisuras. Entre los componentes destacan el circonio o el titanio, componentes omnipresentes en las fritas. La forma esférica revela que, una vez formado el líquido a alta temperatura es tan viscoso, que condiciona el sólido de morfología esférica (forma geométrica de mínima área). El rápido enfriamiento en el seno del aire colapsa la estructura dentro del estado amorfo, impidiendo la disposición ordenada de los elementos constitutivos para la formación de una red cristalina. Esta génesis es muy parecida a la que tiene lugar en la quema de los carbones dando lugar a las cenizas volantes.

7.2.2. La temperatura de la superficie del fundido

La temperatura real en la superficie del baño es una de las causas más importantes de la generación de material particulado puesto que la mayoría de compuestos volátiles se producen a alta temperatura. Las medidas más efectivas encaminadas a la minimización de la emisión son:

- Incrementar al máximo la cantidad de cascote, o material amorfo en la alimentación. De entrada reduce la temperatura y, en consecuencia, el consumo de combustible.
- Emplear, cuando sea posible, la fusión eléctrica.
- El diseño y la geometría de los hornos. Ello mejora las corrientes convectivas en el líquido y la transferencia de calor. Los grandes hornos son energéticamente más eficientes y sus emisiones, por unidad de fundido, son menores.

7.3. EMISIONES DE CARÁCTER ÁCIDO

Casi todas las materias primas en mayor o menor cantidad contienen algo de elementos halógenos. En el caso de los hornos de vidrio y de fritar es común emplear fundentes como la fluorita, F_2Ca, si bien en estado puro tiene un punto de fusión alto: 1.392 ℃.

En el caso de la fusión eléctrica (en los hornos de «capa fría»), la fluorita irá cayendo hacia el interior de la capa. Esta, como ya se ha comentado, presenta un gradiente de temperatura que va desde la temperatura del baño: 1.500 ℃ hasta los 80 ℃. Es obvio que en algún punto de la misma la fluorita se descompone, funde y la presión hidrostática a la que está sometida induce a que ataque a los materiales adyacentes antes que a su salida por la parte superior, a través de la capa de materia prima (Por esta razón casi no se detectan emisiones de halógenos en los hornos de vidrio de fusión eléctrica).

La mayoría de los gases ácidos son fáciles de abatir, por vía seca, o mejor semiseca en una torre de absorción, o también denominada de neutralización. La absorción es una operación básica en la que se separa uno o más componentes de una mezcla gaseosa por medio de un líquido en el que son solubles. El ejemplo más típico es:

$$HCl + Ca(OH)_2 \rightarrow Cl_2Ca + H_2O$$

Para que el proceso, aparentemente sencillo, se lleve a cabo con éxito se han de tener en cuenta las relaciones de equilibrio y, sobre todo la velocidad con la que se desarrolla el proceso. Por tanto la absorción deviene una operación básica en que la difusión adquiere una importancia capital.

Para los demás gases ácidos, los principios elementales del abatimiento de los compuestos son:

- $2\ HF + Ca\ (OH)_2 \rightarrow CaF_2 + 2\ H_2O$
- $2\ SO_2 + 2\ Ca\ (OH)_2 \rightarrow 2(CaSO_3 \cdot ½\ H_2O) + H_2O$
- $SO_3 + Ca\ (OH)_2 \rightarrow CaSO_4 \cdot 2\ H_2O$

7.3.1. El problema del cloro

En los hornos convencionales de fusión por combustión el cloro es uno de los primeros elementos que se disocia. La reacción teórica de oxidación de un compuesto clorado es:

$$C_xH_yCl_z + q \cdot O_2 \rightarrow m \cdot CO_2 + n \cdot H_2O + p \cdot ClH$$

Sin embargo, en la realidad, los productos de la combustión no son los indicados, sino que debe añadirse el cloro elemental (cloro gaseoso), según la reacción de equilibrio de Deacon:

$$2\ ClH + ½\ O_2 \leftrightarrow Cl_2 + H_2O$$

La ecuación de equilibrio indica que el vapor de agua desplaza la reacción hacia la izquierda, ya que la presencia de cloro no es deseable por sus características corrosivas y tóxicas. Además los átomos de cloro son retardantes de llama, puesto que captan los radicales de hidrógeno, que actúan como propagadores de la reacción de oxidación. Es por ello que es difícil conseguir una oxidación completa de los compuestos clorados.

En otras palabras, la presencia de cloro es omnipresente, ello lo demuestra los análisis de gases llevados a cabo en una gran cantidad de hornos. Si el cloro permanece en forma de HCl es fácil de tratar pero si hay presencia de oxígeno se forma cloro elemental, muy peligroso y casi imposible de eliminar.

La Figura 7.43 muestra la evolución de la formación de cloro en función de la concentración de oxígeno en los gases de combustión.

De acuerdo con la constante de equilibrio y a presión atmosférica, que es como suelen trabajar estos hornos, la gráfica anterior muestra que:

- A mayor contenido de O_2, mayor cantidad de Cl_2.
- A mayor cantidad de aire, mayor formación de Cl_2.
- A mayor cantidad de H_2O, menor cantidad de Cl_2.

En los hornos abiertos convencionales de gas, aun que trabajen con muy poco oxígeno, la depresión creada por el ventilador de tiro obligará a una pequeña admisión de aire. Además obsérvese que a partir de un ligero exceso de oxígeno, la formación de cloro es importante.

Es obvio que el mejor tratamiento consiste en evitar su emisión y ello es lo que se logra en el horno de fusión eléctrico.

7.4. LIMITES DE EMISIÓN Y DEPURACIÓN DE GASES

Por el momento no existe una legislación específica para la industria cerámica y del vidrio (la que más se asemeja a la vitrificación de residuos) en materia de contaminación atmosférica, sin embargo la Directiva 96/61 de la UE sobre Control y Prevención Integrado de la Contaminación (DOCE L.257.10. 10.97), más conocida por sus siglas IPPC y ya transpuesta a la legislación ambiental española, plantea una visión integral y conjunta de la actividad económica e industrial como un flujo de materiales que se extraen de la naturaleza, se procesan, producen energía, o la consumen, y se expenden como bienes de consumo.

La directiva, en el fondo, pretende llegar a un «sumatorio» sobre la cantidad de contaminantes generados por una determinada industria con independencia de que se produzcan en forma de residuos sólidos, aguas residuales o emisiones gaseosas. En ella los materiales cerámicos quedan recogidos en las actividades sobre las que se aplicará la directiva en el apartado 3 de Industrias Mineras dentro de los subapartados:

- 3.3. Fabricación de vidrio, incluida la fibra de vidrio, con capacidad de fusión superior a las 20 t/día.
- 3.4. Fabricación de productos cerámicos mediante horneado, en particular tejas, ladrillos refractarios, azulejos, gres cerámico o porcelanas. Producción superior a 75 t/día y/o horneado de más de 4 m^3 y más de 300 kg/m^3 de densidad de carga por horno.

Es obvio que dado que dentro de esta clasificación se hallarán la inmensa mayoría de las actividades de vitrificación, es preciso ahondar un poco en los pormenores de la mentada directiva. La citada directiva viene a establecer:

- Los límites de emisión ajustados a las mejores tecnologías disponibles: «*Best Available Technologies*» (BAT's) que impliquen la menor generación de residuos, aumento en la eficacia del consumo energético, reducción en el consumo de materias primas, en particular agua, uso de materias primas menos peligrosas y reducción de riesgos para el medio.

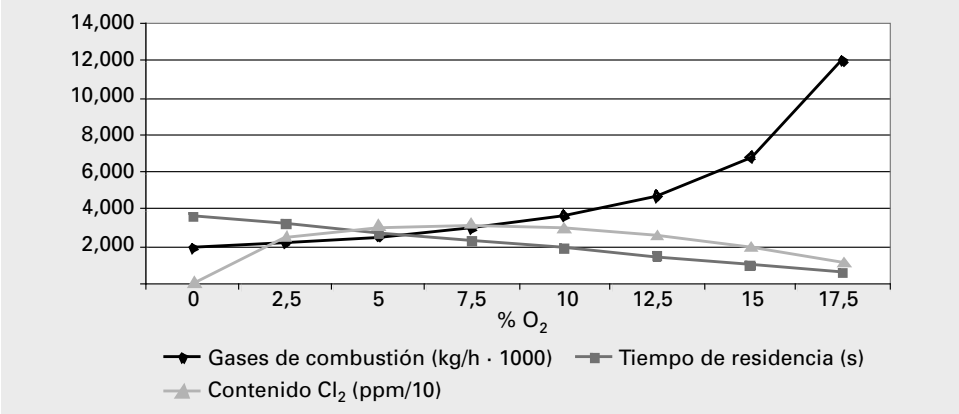


Figura 7.43. Contenido de cloro según presencia de oxígeno.

- Autorización única: todas las industrias afectadas deberán pedir una nueva autorización, de acuerdo con los criterios que emanan de la citada directiva.
- Transparencia informativa: la directiva pone a disposición pública las autorizaciones y modificaciones por parte de la autoridad competente y prevé la publicación del inventario de las emisiones de las actividades industriales afectadas.
- Principio de prevención: la directiva establece el principio de reducción de las emisiones al mínimo, si estas no pueden evitarse.

Es por todo ello que en la Tabla 7.36 se han planteado unos supuestos límites de emisión que presumiblemente se impondrán, a lo mejor con más rigor puesto que a la problemática en si hay que destacar que los países con mayor peso económico de la UE no disponen de instalaciones significativas de hornos de esta naturaleza y es fácil imaginar que van a ser más exigentes sobre todo con emisiones probadamente peligrosas.

El único país que, por ahora, ha legislado en este sentido es la región de la Emilia, Italia, debido a los problemas específicos de gran concentración de fabricantes de fritas de la zona.

7.5. MONÓXIDO DE CARBONO Y OTROS CONTAMINANTES

En este apartado se comentan los aspectos ambientales producidos por la emisión de contaminantes especiales.

7.5.1. La emisión de CO

En los procesos industriales es difícil conseguir una combustión completa, o sin la presencia de inquemados. Durante el proceso de combustión se presentan oscilaciones de la temperatura que es preciso corregir de manera constante. Esta corrección suele llevarse a cabo por medio de la regulación de la cantidad del aire que se está aportando al quemador. Cuando la masa de comburente varía la hidrodinámica de la mezcla (aire/gas) se altera y las probabilidades de que aparezcan inquemados, aunque sea de forma instantánea, es muy grande. De hecho esta contingencia ya la prevén los diagramas de combustión, donde la posibilidad de generar inquemados es muy elevada.

A pesar que las cámaras de los hornos de fritar y de vidrio presentan un tiempo de residencia alto, más que suficiente para la destrucción térmica de todos los compuestos orgánicos (toda clase de hidrocarburos), la presencia del CO es un caso bien particular. Así el primer inquemado, y más común, que aparece en la combustión es el monóxido de carbono. Se trata de un gas venenoso, cuya ecuación de formación, a partir del metano:

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow 2\,H_2O + CO_2 + CO \text{ (trazas)}$$

indica, suponiendo que la mezcla de combustible-comburente en el quemador sea correcta, que:

- Cuanto más carbono esté presente en el combustible, mayor potencial de formación de CO.
- La producción de CO disminuye con el incremento del exceso de aire.
- La producción de CO aumenta con el incremento de la temperatura.

Este ultimo parámetro es el más importante y el que explica el porque aparece CO en los gases de combustión en los hornos que trabajan a alta temperatura. La presencia de CO en el interior de la cámara es importante, no obstante en la chimenea, con independencia del exceso de aire usado, suele aparecer poco CO, la explicación estriba en el hecho la ecuación que define la oxidación del CO a dióxido de carbono:

$$CO + \tfrac{1}{2}\,O_2 \rightarrow CO_2$$

Se desplaza hacia la derecha a medida que disminuye la temperatura. Ahora bien, si tan mal se lleva a cabo la mezcla de gas y aire en el quemador y tanto CO se genera, con independencia de la cantidad de oxígeno presente, se emitirá CO a la atmósfera. Vale la pena hacer un par de reflexiones sobre la eliminación del CO. Es frecuente pensar que el aumento súbito del comburente, gran exceso de aire, arregla la situación. La experiencia demuestra que ello no es así (a veces incluso se incrementa el CO), lo único que hace el gran exceso de aire es aumentar el consumo de combustible. Si la adición de aire se lleva a cabo después del horno: dilución (práctica prohibida para muchas aplicaciones) el efecto es el enfriamiento de la corriente y, por tanto la inversión de la tendencia de la reacción. La temperatura de transición se halla alrededor de los 500 ℃.

Tan importante y común es la presencia de CO que su presencia se usa para definir el concepto de eficacia de la combustión (CE) como el resultado del cociente:

$$CE = 100 \cdot \frac{CO_2}{CO_2 + CO}$$

Es obvio que en la fusión eléctrica no existe el CO, puesto que no hay combustión.

7.5.2. Importancia de la calidad de la atmósfera

En los hornos de fritar y de vidrio convencionales la atmósfera es, al menos en teoría oxidante ya que trabajan con un ligero exceso de aire que oscila del 5 al 15%. En cualquier caso está asegurada la presencia de oxígeno en los gases. Ahora bien como enseñan los diagramas de combustión y la realidad se encarga de constatar, siempre o casi siempre hay cantidades importantes de gases reductores principalmente CO y H_2 en los gases de combustión.

Además en la cámara de combustión se hallan presentes una gran cantidad de hidrocarburos. No obstante el elevado tiempo de residencia de los gases, algo más de dos segundos en la mayoría de los hornos y la alta temperatura, superior a los 1.400 ℃, garantizan la oxidación de todos ellos, a excepción del monóxido de carbono.

La reducción del CO solo será posible en la medida que la temperatura de los gases descienda, circunstancia que acontece durante el enfriamiento, pero no en la cámara de combustión.

Así pues queda garantizada, en la inmensa mayoría de los hornos, la presencia del CO. Como potente reductor éste gas, que además es difusible, altera la gama de colores puesto que reduce la valencia de los metales cromóferos. En las estructuras de los silicatos fundidos la posición del hierro en sus diversas valencias ha sido muy estudiado. En el clásico ejemplo de la cocción de porcelana, o vajilla blanca, cuando las vagonetas pasan por la zona de 1.200 ℃ se genera algo de CO que obliga a las trazas de Fe_2O_3 (rojo) a pasar a FeO (blanco).

En los vitrificados el óxido de hierro puede actuar como formador de vidrio, sobretodo en aquellos vidrios donde el óxido de hierro es muy abundante así como los metales alcalinos y alcalinotérreos. Pero también, como óxido ferroso, actúa como modificador de la red. La propia naturaleza da numerosos ejemplos de ello en la composición de las rocas ígneas.

En la fabricación del vidrio se ha estudiado profusamente el efecto de la presencia de hidrógeno, vapor de agua y, naturalmente de oxígeno. Lo difícil es evaluar el efecto combinado del conjunto de ellos además de la basicidad, o acidez del propio fundido. Por lo general la presencia de gases es un factor de control complicado y sus consecuencias, con frecuencia son nefastas.

Muchas veces el responsable de la presencia de CO son los carbonatos que se introducen como materia prima. El carbonato de descompone y genera CO_2 pero este puede ser fácilmente reducido a CO. En resumen, el CO_2 y el CO ínter actúan sobre los metales del fundido.

Otro parámetro a tener en cuenta, si hay azufre en la atmósfera del horno, es la emisión de H_2S, si la atmósfera es reductora o SO_x si la atmósfera es oxidante.

En el caso de emplear hornos de fusión eléctrica no cabe hablar de la interacción de los compuestos volátiles procedentes de la combustión y sus secuelas. Como se ha comentado, en el caso de la fusión eléctrica solo hay que constatar la incorporación de los «volátiles» a la red vítrea empezando por el flúor y el cloro.

7.6. LA EMISIÓN DE SO_x

Por lo que hace referencia al SO_2 existe una clara correlación entre la cantidad de fuelóleo, o gasóleo, usado y el SO_2 generado. La retención de los compuestos de azufre en los vidrios es baja, por lo general inferior al 0,3% en los vidrios industriales, de ahí el problema de las emisiones.

La cantidad de SO_3 producido representa un pequeño porcentaje del monto de SO_2, aunque éste suele estar por encima de los valores correspondientes a la concentración en equilibrio. Por debajo de los 200 ℃, el trióxido de azufre reacciona con el vapor de agua presente para formar ácido sulfúrico (SO_4H_2). Este es el principal causante de las corrosiones en las instalaciones. Para evitar la condensación, punto de rocío, no hay otra alternativa que emitir los gases a elevada temperatura, lo que repercute en el consumo energético del horno. La Tabla 7.39 indica las cantidades de SO_x en función del tipo de combustible.

Tabla 7.39. Cantidad de azufre según tipo de combustible

Tipo de combustible	mg SO_2/Nm^3 (al 8% de O_2)
Gas natural	200-900
Gasoil	300
Fuelóleo BIA (1% S)	550-1.300
Fuelóleo n.° 1 (2,5% S)	2.000-3.000

En cualquier caso el SO_x formado en la combustión de gas natural es poco y fácil de abatir en el sistema de neutralización de gases ácidos. Obviamente este problema no existe en el caso de la fusión eléctrica.

Aspecto diferente lo constituye la generación de SOx procedente de la descomposición de determinadas materias primas, como los sulfatos. Estas sales son ampliamente usadas en las formulaciones de los

vidrios, como introductores de óxidos y también como agentes oxidantes. El más empleado es el sulfato sódico, aunque son también frecuentes los de potasio y calcio.

7.7. LOS METALES

La presencia de metales en los hornos de vitrificación es abrumadora, no en vano todo el proceso de formación de vidrio se basa en la unión de óxidos metálicos. No obstante el problema ambiental surge cuando existe el peligro de emisión de metales pesados a la atmósfera.

La fuente de metales es debida a:

- Adición de metales para diversos usos y proporcionar diferentes acabados en los vidrios.
- Impurezas en las materias primas.
- Contenidos importantes de metales en las materias primas. Tal seria el caso del empleo de ciertos residuos como elementos básicos en la formulación del vidrio.

7.7.1. Adición de metales

Dejando a un lado aquellos vidrios que contienen cantidades importantisimas de metales, como el Pb, Sr y Ba en el caso de pantallas de TV y ordenadores, o el B en el caso de vidrios de borosilicato o fritas, la presencia de metales cromóferos es muy importante como elementos colorantes, como atestigua la Tabla 7.40.

Tabla 7.40. Elementos usados como cromóferos

Metal	Ión	Color
Cobre	Cu^{2+}	Azul suave, claro
Cromo	Cr^{3+}	Verde
Cromo	Cr^{6+}	Amarillo
Manganeso	Mn^{3+}	Violeta
Hierro	Fe^{3+}	Marrón-amarillo
Hierro	Fe^{2+}	Verde-azul
Cobalto	Co^{2+}	Azul intenso. En vidrios de borosilicato: rosa.
Cobalto	Co^{3+}	Verde.
Níquel	Ni^{2+}	Depende del vidrio. Gris, amarillo, verde, violeta, etc.
Vanadio	V^{3+}	Verde. En vidrios de borosilicato: marrón.
Titanio	Ti^{3+}	Violeta (en atmósfera reductora)
Neodimio	Nd^{3+}	Rojo-violeta
Selenio	Se^{0}	Rosa. Según el vidrio y $Se^{2+, 4+ o 6+}$, diversos colores de este tono.
Praseodimio	Pr^{3+}	Verde suave, claro

7.7.2. Emisión de metales

La cantidad de metales presentes y el sistema convencional de fusión da lugar a la emisión de cantidades importantes de metales, como muestra la Tabla 7.41.

Tabla 7.41. Potencial emisión de metales en los hornos de vidrio

Metal	Vidrio hueco mg/Nm³	Vidrio plano mg/Nm³	Vidrio de plomo mg/Nm³
Vanadio (en combustible)	> 4	> 2	
Níquel (en combustible)	> 0,5	> 0,4	
Cromo (vidrio verde)	> 3		
Selenio	> 1		
Selenio (vidrio soplado)	> 14		
Plomo	> 4	> 1	> 700
Cadmio	> 0,3	> 0,1	
Antimonio			> 10
Arsénico			> 20

Como se observa las cantidades son significativas, de ahí la importancia de la fusión eléctrica en la fusión de vidrios especiales o en el tratamiento de residuos donde, con frecuencia, se desconoce la caracterización del material introducido.

7.8. VITRIFICACIÓN CONTINUA O INTERMITENTE

El apartado presente se refiere a la forma en que se lleva a cabo el proceso de fusión. En un horno intermitente, o discontinuo (o «*batch*»), el material se introduce en su interior y se prende el quemador. A medida que la temperatura aumenta el proceso de fusión progresa. Cuando toda la carga ha fundido y el líquido tiene una viscosidad adecuada, se detiene el horno y se vierte el fundido, detalle que muestra la foto de la Figura 7.44. Todo lo comentado en los apartados anteriores hace referencia a los procesos continuos de fusión, ya sean eléctricos o de gas. En contraposición la Figura 7.44 muestra la foto de un vitrificador intermitente.

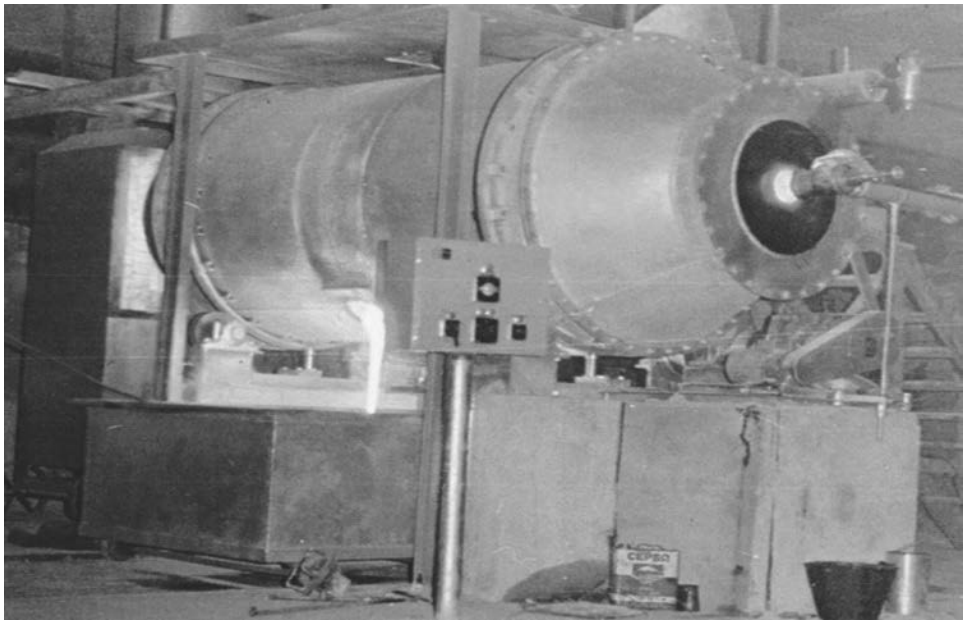


Figura 7.44. Horno de vitrificar intermitente.

Como muestra la Figura 7.44, o todavía mejor en el esquema de la Figura 7.45, el horno consta de un cilindro metálico aislado, cuyo interior se halla revestido de material refractario, animado por un movimiento de rotación. La carga se introduce por una escotilla y, cuando ha fundido se sangra por la misma escotilla.

El consumo energético del proceso intermitente es muy elevado. Las principales causas son:

- Al tratarse de un régimen intermitente cada vez es preciso calentar las paredes del horno.
- Hay mucha admisión de aire parásito, con lo que el consumo de combustible se dispara.

Sin embargo, por lo comentado en el apartado de aspectos ambientales, los principales problemas del uso de este tipo de hornos provienen de:

- En estos hornos, la emisión de partículas es más intensa, por el tiempo transcurrido desde la puesta en marcha hasta la fusión y por el menor tiempo de residencia de los gases.
- La calidad del vidrio no es tan buena como la conseguida en los hornos continuos.

Como ventaja hay que señalar que la inversión es inferior a la precisa para implantar los sistemas continuos.

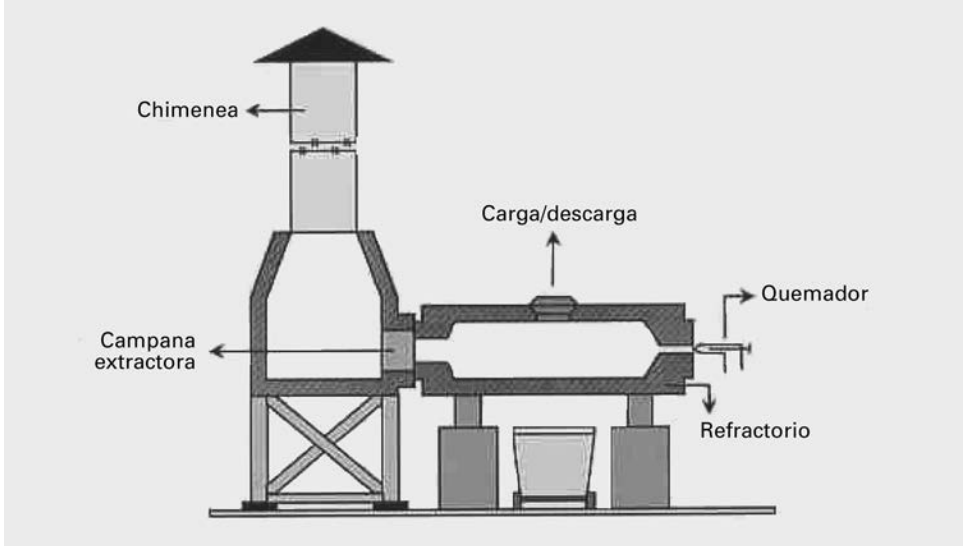


Figura 7.45. Esquema de una instalación de fusión intermitente.

Tabla 7.42. Movilidad relativa de los elementos en el según el medio

Movilidad	Condiciones ambientales			
	Oxidantes	Ácidas	Neutras/básicas	Reductoras
Muy alta	Cl, I, Br, S, B	Cl, I, Br, S, B	Cl, I, Br, S, B, Mo, V, U, Se, Re	Cl, I, Br
Alta	Mo, V, U, Se, Re, Ca, Na, Mg, F, Sr, Ra, Zn	Mo, V, U, Se, Re, Ca, Na, Mg, F, Sr, Ra, Zn, Cu, Co, Ni, Hg, Ag, Au	Ca, Na, Mg, F, Sr, Ra	Ca, Na, Mg, F, Sr, Ra
Media	Cu, Co, Ni, Hg, Ag, Au, As, Cd	As, Cd	As, Cd	
Baja	Si, P, K, Pb, Rb, Ba, Be, Bi, Sb, Ge, Cs, Tl, Li	Si, P, K, Pb, Li, Rb, Ba, Be, Bi, Sb, Ge, Cs, Tl, Fe, Mn	Si, P, K, Pb, Li, Rb, Ba, Be, Bi, Sb, Ge, Cs, Tl, Fe, Mn	Si, P, K, Fe, Mn
Muy baja	Fe, Mn, Al, Ti, Ta, Pt, Cr, Zr, Th, ER	Al, Ti, Sn, Pt, Cr, Zr, Th, ER	Al, Ti, Sn, Te, Cr, Zr, Th, Zn, Cu, Co, Ni, Hg, Ag, Au, ER	Al, Ti, Sn, Ta, Pt, Cr, Zr, Th, S, B, Mo, V, U, Se, Re, Zn, Co, Cu, Ni, Hg, Ag, Au, As, Cu, Pb, Li, Rb, Ba, Be, Bi, Sb, Ge, Cs, Tl, ER

Es pues obvio que, para el tratamiento de residuos se aconseja la fusión o vitrificación en régimen continuo.

7.9. MOVILIDAD DE LOS ELEMENTOS

La movilidad de un elemento en la naturaleza depende, fundamentalmente, de las condiciones de oxidación/reducción. La Tabla 7.42 muestra la relativa movilidad de los elementos en función de las condiciones redox. La tabla indica que la mayoría de los elementos presentan una movilidad menor en condiciones reductoras y mayor en medíos húmedos (en la tabla ER, significa los elementos radioactivos).

Se expone la Tabla 7.43 en relación a las indudables ventajas de la vitrificación como sistema para inmovilizar los componentes tóxicos. A mucha distancia de la vitrificación las tecnologías que habitualmente se emplean para la inmovilización, se muestran en la Tabla 7.43.

La anterior tabla demuestra las propiedades de retención, así como la disminución del factor de azar (K_{wf}) para el encapsulamiento de residuos radioactivos en matrices de cemento. El mejor comportamiento corresponde a las matrices de cemento de alta alúmina.

Tabla 7.43. Lixiviación de diferentes matrices que contienen un mismo residuo (Fuente M. I. Ojovan)

Matriz	Lixiviación (cm^2/día)	Disminución factor K_{wf}
Cemento portland	8,5 · 10-6	32
Composite de portland y escoria de alto horno	2,5 · 10-6	60
Cemento de alta alúmina	2,5 · 10-6	222

Los resultados anteriores están directamente relacionados con las emisiones de metales pesados. Sabido es que, hoy en día la emisión de metales en las incineradoras de RSU (con mayor razón debería hacerse los mismo en las centrales termoeléctricas que consumen carbón) se adsorbe en carbón activo y éste queda al final en la cenizas volantes. Esta tipología de residuos, peligrosos, se pretratan, en España, con mezclas de cemento aluminoso. La Figura 7.46 da una idea de la emisión de metales pesados a la atmósfera en 1983.

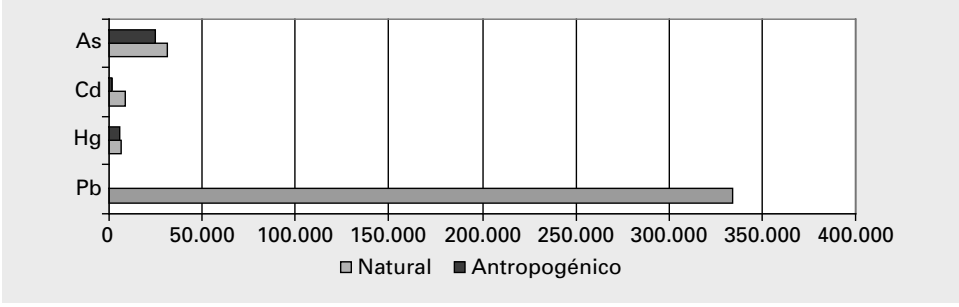


Figura 7.46. Emisiones globales de metales pesados a la atmósfera en 1983.

Como se observa en la estadística del 1983, la mayoría de las emisiones eran de origen antropogénico. Del 1983 al 2000 han entrado en vigor una serie de disposiciones que obliga a determinadas actividades, como la incineración a la captura de metales. En consecuencia, nada hace pensar que la emisión de origen antropogénico haya disminuido, sino mas bien al contrario (el consumo sigue aumentando en todo el mundo). La ventaja es que hoy en día se impide su emisión a la atmósfera y hay tecnologías, como la vitrificación para confinar, de manera segura estos peligrosos contaminantes.

Para completar la exposición y demostrar que la presencia de elementos radioactivos es bien «natural» en la corteza terrestre, la Tabla 7.44 muestra la presencia de elementos radioactivos en rocas (las concentraciones están expresadas en Bq/kg) y minerales sedimentarios empleados habitualmente como materiales de construcción.

Tabla 7.44. Presencia de radionúcleos en rocas naturales

Roca	Uso	^{238}U	^{232}Th	^{40}K	^{87}Rb
Granito	Áridos, piedras ornamentales	40	70	>1.000	170-200
Arcillas	Cerámica, cemento, obra civil	40	50	800	110
Carbonatos	Áridos, cemento, piedra ornamental	25	8	70	8
Suelos	Agricultura, obra civil	66	37	400	50

La Tabla 7.45 muestra la media de las dosis emisiones radioactivas (expresadas en μSv/año), de origen natural, a que nos vemos sometidos anualmente.

Es interesante señalar que, con diferencia, la mayor dosis de radiación proviene del radón (Rn). El radón es un gas radioactivo de origen natural procedente de la desintegración del ^{238}U y del ^{226}Ra de la corteza terrestre y está presente en toda la superficie del planeta y proviene sobre todo de suelos graníticos y volcánicos así como de ciertos materiales de construcción.

Tabla 7.45. Dosis anual media de radiación natural

Fuente	Dosis µSv/año	Media mundial µSv/año
Rayos cósmicos	300-1.000	400
Rayos γ terrestres	300-600	500
Inhalación (^{222}Rn)	200-10.000	1.200
Ingestión (^{40}K)	200-800	300
TOTAL	1.000-10.000	2.400

El radón es el responsable del 34% de la radiación ionizante que reciben los europeos, solo por debajo del 41% que representa la medicina nuclear (radiodiagnósticos).

Es uno de los agentes que provoca cáncer de pulmón, sí bien en una proporción muy lejana a la del tabaco. Se acumula en los espacios cerrados, por esto se recomienda ventilar las viviendas (En especial las que se hallan próximas a las minas o las formaciones geológicas indicadas).

Los descendientes radioactivos sólidos del gas (^{218}Polonio, ^{214}Plomo, ^{214}Bismuto, ^{214}Polonio y ^{208}Plomo estable) emiten partículas alfa que provocan mutaciones celulares y cáncer.

Las autoridades ambientales consideran que los índices peligrosos pueden estar por encima de los 400 Bq/m^3. Se recomienda que en las habitaciones nuevas esta concentración no exceda del valor anual de 200 Bq/m^3. Hay que tener en cuenta que en las viviendas de las zonas graníticas de la Bretaña francesa se supera este límite con mucha frecuencia.

Las vías de entrada del radón dependen de las características de la construcción, de la ventilación y del modo de vida de los habitantes (en las horas de noche no hay ventilación y los niveles se incrementan).

8. Vitrificación por plasma

El plasma también es llamado el cuarto estado de la materia. Los otros tres son: el sólido, el líquido y el gaseoso. Dicho estado se consigue provocando la ionización de un flujo gaseoso, eléctricamente neutro, por medio de un potente campo eléctrico. Ello libera una gran cantidad de energía, siendo posible dirigirla y concentrarla hacia un espacio reducido.

8.1. EL PLASMA Y EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS

La rápida y gran concentración de energía que es capaz de generar una antorcha de plasma ha abierto un nuevo campo en el área de tratamiento de residuos. En primer lugar hay que advertir que esta tec-

nología, por los motivos que se explicaran, es cara en su instalación y su explotación y, por tanto, los residuos que se sometan a ella deberían cumplir dos requisitos previos:

- Desde el punto de vista técnico, que se trate de residuos que contengan sustancia orgánica e inorgánica. Con la primera fracción se lleva a cabo un proceso de pirólisis y gasificación que produce gases y vapores que posteriormente deberán ser tratados (oxidados). Con la fracción inorgánica, debido a las altas temperaturas generadas se facilita la fusión.
- Desde el punto de vista económico, que sean residuos de los denominados tóxicos y peligrosos ya que, si bien ello no afecta al proceso como tal, al tratarse de esta clase de residuos se puede ingresar una cantidad importante de dinero en concepto de tratamiento que va a hacer falta para mantener la rentabilidad de la explotación.

Con referencia a la naturaleza o caracterización del residuo. Si éste es básicamente orgánico significa que tiene un PCI suficiente para mantener el proceso autotérmico y en este caso el proceso de tratamiento más adecuado es la incineración y/o la gasificación. Si la caracterización denota que se trata de un residuo cuya composición es de naturaleza eminentemente inorgánica, su tratamiento adecuado debería ser, como se ha explicado en este mismo capítulo, la vitrificación. Sin embargo, cuando la naturaleza del residuo se halla a medio camino entre uno y otro, la aplicación del plasma térmico puede ser una buena opción para su tratamiento, como pretende simbolizar la Figura 7.47.

El argumento empleado a favor del uso indiscriminado del plasma para glorificar sus ventajas frente a la incineración, no tiene gran sustentación científica. Se aduce que la combustión emanada de un proceso de plasma no depende del PCI del combustible sino del propio plasma. Es decir, cuando la temperatura del proceso es suficiente basta con desconectar la antorcha y volver a enchufarla cuando el residuo no es combustible.

Hay que tener en cuenta que la materia orgánica, en estado sólido o líquido precisa de un cierto nivel térmico para comenzar a vaporizar y gasificar. A partir de aquí las reacciones de oxidación se desarrollan en fases gas-gas y vapor-gas. El calor para esta transformación procede de la propia combustión. Si no existe materia orgánica, con independencia de la temperatura generada, no se producirán gases ni vapores. En este sentido es absurdo también aseverar que un proceso de plasma genera menos gases. Toda la materia orgánica se va a transformar antes de ser emitida por la chimenea en CO_2 y H_2O con independencia del proceso que se aplique. Cosa diferente es la cantidad de aire que sea preciso. En teoría una combustión estequiométrica va a generar la misma cantidad de gases que una antorcha de plasma para una determinada cantidad de materia orgánica. En el caso de que en el horno donde se aplique la antorcha se introduzca aire en defecto con respecto al estequiométrico, se producirá una gasificación y estos gases se deberán oxidar posteriormente con lo que al final el resultado será el mismo. Sintéticamente, se puede resumir argumentando que el calor aportado por la antorcha de plasma suple a la energía de activación.

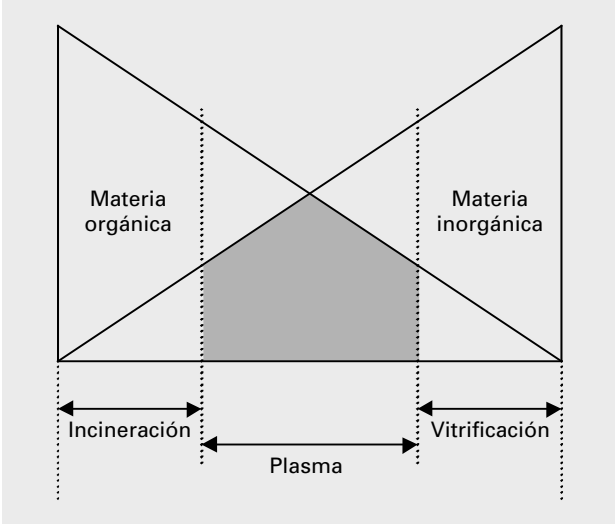


Figura 7.47. Naturaleza de los residuos y el uso del plasma térmico.

8.1.1. Aplicación industrial de una antorcha de plasma

La Figura 7.48 muestra el esquema de una antorcha, también llamada pistola, de plasma. Es del tipo denominado de plasma no transferido. De la boca de la antorcha sale un dardo, o jet, de plasma a alta temperatura (mas de 15.000 ℃) y a elevada velocidad, de ahí la denominación de jet, que puede superar los 300 m/s.

La antorcha puede ser aplicada a cualquier tipo de horno. La materia inorgánica fundirá y será sangrada al final del horno, mientras que los gases pasarán a la cámara de postcombustión.

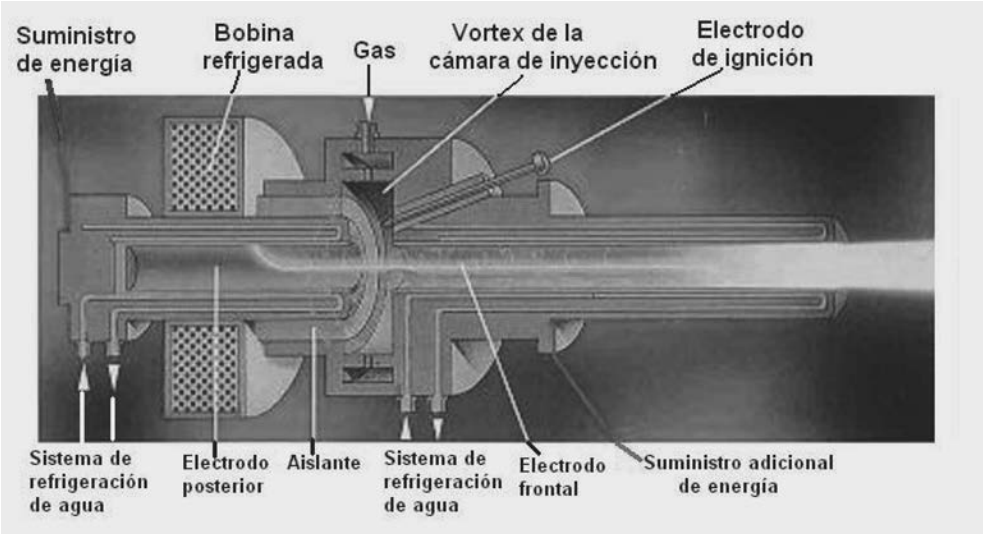


Figura 7.48. Aplicación de una antorcha de plasma a un horno rotatorio.

8.1.2. La antorcha de plasma y la temperatura

La foto de la Figura 7.49 reproduce un horno de solera fija accionado por una antorcha de plasma, de la firma Hera. El horno es más o menos de concepción convencional. Tiene una zona de entrada para la alimentación de los residuos y otra para la extracción de escoria fundida y limpieza. Además dispone de la preceptiva chimenea y los registros de vigilancia y otros para la ubicación de los termopares. Como se aprecia la antorcha se halla situada en la parte media izquierda de la foto y dirigida hacia la solera.

Cuando el residuo se halla en la solera del horno se prende la antorcha. En este momento la distribución de temperatura en el interior del recinto es muy dispar. Así, la zona donde incide la antorcha y sus inmediatos aledaños se alcanzan casi los 3.000 ℃, mientras que la gran parte del espacio interior la temperatura media escasamente roza los 1.000 ℃. Esta falta de isotermia no sorprende habida cuenta que el calor está generado, en el caso presente, por un foco puntual (antorcha) y como la presión en el interior es muy baja, la distribución de temperaturas debe ser, necesariamente, irregular. Por ello en estas instalaciones es preceptivo que se incorpore una cámara de postcombustión.

Figura 7.49. Horno con antorcha de plasma.

De hecho estas instalaciones, cuando se destinan a la destrucción térmica de residuos, sustituyen el horno convencional por otro con refractarios preparados para soportar temperaturas mayores y choque térmico. Sin embargo, la misión del horno es siempre la misma: volatilizar, gasificar y vaporizar la materia orgánica para transformarla de su forma sólida o líquida a gas para favorecer su posterior oxidación. La oxidación se lleva a cabo en otra cámara, la cámara de oxidación y posteriormente los gases deben entrar en la cámara de postcombustión. La recuperación de calor, como en el caso de una incineradora convencional, se realiza en una caldera de recuperación donde el vapor de agua generado se expande en una turbina para producir electricidad.

Caso diferente lo constituye el comportamiento de los materiales inorgánicos. Los metales que se encuentran repentinamente a tan alta temperatura volatilizan. Los carbonatos se descomponen y liberan CO_2, mientras que la gran mayoría de los silicatos a esta gama de temperaturas funde. El problema es conocer la caracterización previa del residuo y poder añadir los vitrificantes para que el fundido sea estable. De todas maneras este es un problema menor, no así el control de los metales presentes. La ausencia de oxígeno favorece la reducción de los óxidos y por tanto reduce los puntos de fusión (para vitrificar

es imprescindible que los metales se hallen oxidados. Además, por lo general, el punto de volatilización de los metales es inferior a su correspondiente óxido). Otra problemática añadida es que la presencia de metales en la matriz vítrea facilita la segregación de fases en los vitrificados. En cualquier caso una instalación de este tipo, a la salida de la caldera de recuperación dispone de una completa instalación de tratamiento y depuración de gases por lo que no hay peligro de emisión a la atmósfera.

Finalmente la Figura 7.50 muestra la foto de un horno, de la citada marca, formando parte de una instalación industrial.

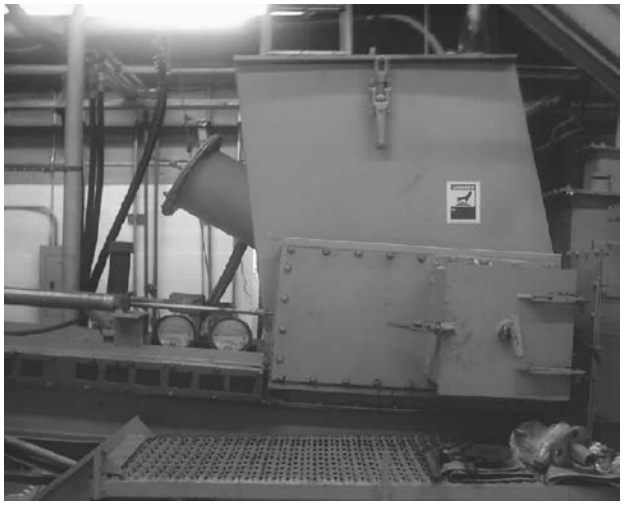


Figura 7.50. Vista lateral de un horno con antorcha de plasma.

En el campo de la recuperación de metales, con frecuencia la masa de material residual de valor o precio elevado a recuperar, o bien a tratar, suele ser una cantidad pequeña en relación a la masa total del residuo (soporte del catalizador), es por ello que deben valorarse las tecnologías capaces de incidir de manera más contundente sobre el total. Es decir: la aplicación de una gran cantidad de energía sobre un residuo es capaz de liberar el material valioso a base de fundir o evaporar el resto sin valor. La antorcha de plasma permite maximizar la transferencia de energía en los procesos donde el coste del plasma se vea compensado por el valor del material recuperado.

8.2. OTRAS POSIBILIDADES DEL PLASMA COMO HERRAMIENTA PARA EL RECICLAJE

Las diversas y continuas aplicaciones que van realizándose con el plasma abren nuevas vías al reciclado de materiales y, sobre todo, a la metalurgia secundaria que, en definitiva, es otra forma de valorización.

Los metales reactivos como el Ti, Al, Cu o los refractarios, como el Ni, Cr, Fe y muchos de los llamados metales nobles se oxidan rápidamente cuando están fundidos y ello dificulta su recuperación, tal es el caso de ciertos aceros o el cobre.

Los metales reactivos más sobresalientes son Ti, Zr y Hf. Y se denominan de esta manera porqué atrapan el oxígeno contenido en ciertos óxidos refractarios (por ejemplo de los propios materiales refractarios que componen los hornos de fusión). En otras ocasiones el aire en contacto con el metal fundido, lo ataca y lo oxida. De ahí la necesidad de usar atmósferas controladas y/o neutras, como la que puede proporcionar la antorcha de plasma.

En otras circunstancias la metalurgia de metales super refractarios como el Nb (p.f. 2.468 ℃), Mb (p.f. 2.617 ℃), Tl (2.996 ℃) o Tg (3.410 ℃) precisa de cuidados muy especiales puesto que son fácilmente oxidables al contacto con el aire. En los últimos años se han instalado en EE UU algunos hornos de plasma para recuperar Ti y Zr a partir de chatarra.

8.2.1. Recuperación de aluminio

Los hornos de aluminio, a partir de chatarra, funden platas, botes, envases, etc., para recuperar el metal. El horno de fusión es semejante a un horno de producción de vidrio pero que trabaja a mucha menor temperatura. Al baño de aluminio se le añaden sales para mejorar la fluidez del metal sin necesidad de aumentar la temperatura y, en consecuencia, minimizar la oxidación, pero estas sales conducen a conflictivas emisiones.

El horno de plasma resuelve estos problemas sin necesidad de añadir sales al baño. En el horno se puede usar aire pero ello ocasiona un 5% de pérdidas por oxidación del metal, además hay formación de nitruros y NO_x. La atmósfera de nitrógeno incrementa la generación de nitruros. En conclusión la mejor atmósfera es la de argón, como gas plasmógeno.

8.2.2. Recuperación de metales refractarios

La tecnología de plasma puede usarse para la recuperación de metales preciosos contenidos en los catalizadores de automoción o los presentes en la chatarra electrónica. Teniendo en cuenta que la cantidad de metales preciosos es reducida, se usa el hierro o el cobre para conseguir suficiente metal líquido para proceder a la futura recuperación.

Una de las aplicaciones más prometedoras es la valorización del polvo de acería. Para ello se realiza una mezcla de polvo de acería con coque, se peletiza y se introduce en un horno equipado con una antorcha de plasma a una temperatura entre 3.000 y 5.000 ℃. En estas condiciones todos los elementos inorgánicos son reducidos a su forma metálica y en estado líquido. El Fe, Cr, Ni y Mo son recuperados en el fondo del crisol, mientras el Pb y el Zn se volatilizan y se condensan para su recuperación. Los gases calientes se usan para generar electricidad en un ciclo de vapor.

8.2.3. La recuperación de metales catalizadores

La utilización de catalizadores se halla muy extendida en el campo de la obtención y síntesis de productos químicos. Los catalizadores contienen metales específicos para la labor que deben realizar, siendo los más frecuentes: V, Ni, Ti, Co, Mo, W, etc.

Cuando los metales o determinados compuestos orgánicos presentes en la materia prima a procesar, generalmente el crudo de petróleo, inhiben la labor de los metales catalizadores, éstos deben sustituirse ya que han perdido la capacidad de regeneración y son, por tanto, residuos.

El proceso básico de recuperación consiste en la fusión del catalizador agotado. Como sea que estos metales presentan un elevado punto de fusión, el consumo energético es muy elevado (a veces del orden de las 7.000 Kcal/kg), por ello se procura añadir carbón que además de actuar como agente reductor aporta un importante poder calorífico que contribuye a disminuir el consumo global del proceso.

El sistema de recuperación tradicional, cuando el soporte del catalizador es alúmina consiste en la adición de cal para reducir la temperatura de fusión desde 2.000 ℃ hasta unos 1.500 ℃. Simultáneamente se añade una cantidad de carbón para favorecer la reducción de los óxidos a metales. Con estos procesos pirometalúrgicos las tasas de recuperación no suelen superar el 50%.

La tecnología del plasma permite, en una sola etapa y en continuo, la recuperación de los metales de los catalizadores agotados. Se obtienen tasas de recuperación del 90% para metales como el Co y Mo, obteniéndose los metales en forma de ferroaleación.

En determinadas plantas de tratamiento se aplica el plasma para la vitrificación de las escorias procedentes de la incineración de los RSU. La medida parece un poco desproporcionada si se tiene en cuenta el importe de la instalación y, sobre todo, los costes de explotación.

El DVD adjunto, en el punto 5, se muestra información complementaria sobre diversos sistemas de plasma térmico y su aplicación al tratamiento de residuos.

9. Vitrificación *in situ*

La vitrificación *in situ* surge como alternativa a los sistemas de biorremediación biológica en aquellos casos en que la concentración de contaminantes, mezcla de orgánicos e inorgánicos es tan compleja y las características de difusión en el terreno son tan especiales que se decide transformar el terreno contaminado en un «vertedero vitrificado» *in situ*. Por ello esta técnica debe considerarse de tratamiento ya que no hay valorización alguna.

En el proceso *in situ*, las altas temperaturas necesarias para fundir el suelo hasta obtener una masa se consiguen mediante la aplicación de una corriente eléctrica. Al discurrir la corriente por el suelo se genera calor, que provoca que el suelo comience a fundir. Al fundirse, los suelos se vuelven mejores conductores eléctricos y la masa fundida se transforma en un medio de transferencia de calor que permite que el mismo proceso continúe.

El proceso se inicia empleando una capa de grafito y vidrio micronizado que actúa como puente térmico inicial. Generalmente se emplean electrodos situados de manera rectangular y espaciados entre sí un máximo de 5 m. Una vez iniciado el proceso, la masa fundida crece en profundidad y anchura hasta una profundidad máxima de aproximadamente 9 m para dar lugar a una masa total fundida de 900 t. Las etapas del proceso se representan esquemáticamente en la Figura 7.51. El residuo resultante se asemeja a la obsidiana, formada en la naturaleza por el proceso natural de vitrificación.

El suelo se funde a razón de 3,5 a 5,5 toneladas por hora, con una velocidad de avance del material fundido de 2,5 a 5 cm por hora. Al aumentar la temperatura, los compuestos orgánicos primero se vaporizan y luego se pirolizan (descomposición en ausencia de oxígeno) craqueándose a sus compuestos

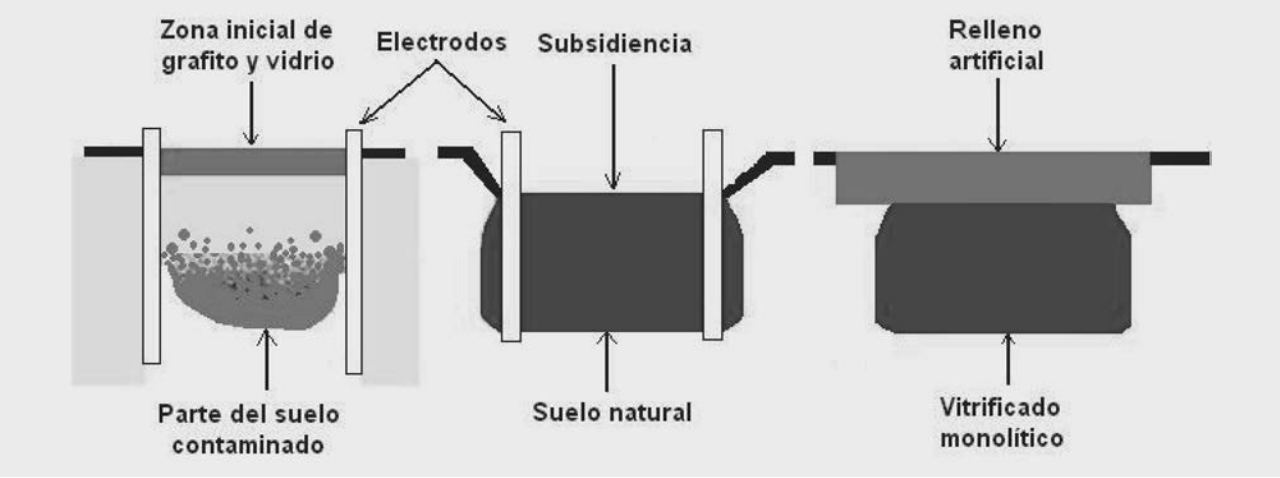


Figura 7.51. Proceso de vitrificación *in situ*.

elementales. Los gases se desplazan lentamente a través de la masa fundida (que es viscosa) hacia la superficie. Una parte de los gases se disuelven en la masa fundida, mientras que otra se emite al medio ambiente. Al desprenderse, los gases combustibles se oxidan en presencia de aire. Todos los gases se recogen (se construye una campana sobre la zona de actuación) y tratan, para cumplir las normativas de emisión a la atmósfera.

Debido a la alta temperatura de la fusión (1.600 a 2.000 ℃), en el residuo (vidrio) no permanece ningún contaminante orgánico. Los contaminantes inorgánicos se comportan de manera similar, unos se descomponen mientras otros se disuelven o reaccionan con el fundido. Por ejemplo, los nitratos dan nitrógeno gaseoso (N_2) y oxígeno (O_2) y el óxido metálico se integra en la matriz vítrea.

9.1. VITRIFICACIÓN Y TRATAMIENTO DE SUELOS

Algunas variantes de la vitrificación *in situ* se han diseñado y ensayado a escala piloto y semiindustrial para la recuperación de suelos contaminados.

El uso de suelos contaminados como materia prima para la fabricación de vidrio (vitrificación) ofrece algunas ventajas como técnica de gestión de residuos peligrosos. Esta tecnología permite la posibilidad de tratar los residuos peligrosos, en especial suelos contaminados, y de obtener un producto útil (por ejemplo, como agregado para carreteras). En esta técnica se utiliza un horno de fabricación de vidrio que trabaja a 1.600 ℃. Para iniciar el proceso se usa una mezcla de iniciación de vidrio reciclado, cenizas volantes de centrales termoeléctricas y caliza. Se introduce entonces el suelo contaminado en el horno para las etapas de fundición y fusión, que duran como mínimo cinco horas. Hasta el momento, la utilización de las técnicas e instalaciones de la fabricación de vidrio para la gestión de residuos peligrosos no se realiza a escala comercial, aunque se han demostrado a escala piloto en el programa USEPA SITE (Evaluación de Tecnologías Innovadoras del Superfondo).

Otras consideraciones a tener en cuenta en la técnica de vitrificación son las emisiones a la atmósfera y la capacidad de lixiviación del residuo (el vidrio). Las emisiones a la atmósfera pueden ser retenidas y tratadas adecuadamente para la protección ambiental empleando las técnicas tradicionales de tratamiento de gases como amoníaco para NO_x, hidróxido cálcico para SO_x y abatimiento de volátiles en un lecho relleno de adsorbentes.

Al igual que el producto de la vitrificación *in situ*, los ensayos de lixiviación han mostrado que el vidrio es inerte. A pesar de estos resultados, ciertos autores creen que se puede obligar a que este producto se utilice en aplicaciones que limiten su distribución al público en general. Por ejemplo, la construcción y operación de vertederos requieren diariamente cantidades importantes de material de relleno limpio, para cobertura, para las contenciones intermedias y para capas de drenaje. La utilización de producto vitrificado en estos casos proporcionaría un margen mayor de seguridad al proceso y conservaría los recursos minerales para otros usos futuros más racionales. Otra alternativa es la encapsulación de estos granulados en masas asfálticas.

De manera similar a la vitrificación *in situ*, los residuos de asbestos también se han tratado por vitrificación. Desde 1984 opera en Gran Bretaña una planta piloto con capacidad para 500 kg por día. Los asbestos, mezclados con escombros de vidrio y otros aditivos de la fabricación de vidrio, se funden a 1.400 ℃ durante aproximadamente 10 horas. Durante la fusión los asbestos se vuelven amorfos y se mezclan con otros silicatos. Tras el enfriamiento, el vidrio no es tóxico y se emplea como agregado de relleno en el hormigón. Los tiempos de fusión deben tomarse con precaución ya que dependen del tipo de horno y, sobre todo, de la formulación del fundido.

10. Los vitrocerámicos

Los vitrocerámicos constituyen una especie relativamente nueva de materiales inorgánicos, esencialmente no metálicos y microcristalinos, obtenidos por desvitrificación controlada de vidrios preformados. Por tanto no son vidrios (estructura amorfa) sino materiales policristalinos. La primera serie industrial apareció en 1957 (Pyroceram).

Los vidrios se encuentran «congelados» en estado de subenfriamiento, con un contenido energético mayor que el equilibrio termodinámico, por ello pueden evolucionar en condiciones favorables para formar especies cristalinas estables. El vidrio madre, destinado a la producción de vitrocerámicos, es producido por las técnicas tradicionales. En una segunda etapa se somete a la fase de cristalización, en el curso de la cual el vidrio es calentado a temperaturas moderadas que faciliten la nucleación o formación de gérmenes cristalinos y el crecimiento de fases cristalinas o cristalización. En líneas generales, para obtener una nucleación efectiva, la temperatura óptima de nucleación debe situarse dentro del intervalo térmico correspondiente a un valor de la viscosidad igual a 10^{11}-10^{12} dPas, es decir temperaturas ligeramente superiores a la temperatura de transformación vítrea (T_g), la cual representa la frontera entre el estado rígido y el plástico de un vidrio. La cantidad usada de agente nucleante suele estar comprendida entre el 1 y el 10%.

Con este sistema se obtiene un material cerámico que posee unas elevadas prestaciones pero, sobre todo está exento de los defectos inherentes a los materiales obtenidos por medio de los sistemas convencionales de fabricación, como es la porosidad y la distribución heterogénea de las fases cristalinas. Habida cuenta que es factible alterar la microestructura, también es posible fabricar los cristales que potencien determinadas propiedades fisicoquímicas. Todo ello está subordinado a la posibilidad de controlar los fenómenos de desvitrificación.

El promotor, o precursor, de estas reacciones son los denominados catalizadores. Para ello son empleados los óxidos de cerio y antimonio aunque su efectividad está condicionada a una fuente de radiación. Diferente es el caso de Cu, Ag y Au que en estado coloidal permiten su perfecta difusión en el vidrio. Más recientemente se han desarrollado otros elementos como CdS, NaF, Na_3AlF_6, etc.

Existe toda otra clase de catalizadores compuestos por óxidos solubles en los vidrios silicatados que actúan siguiendo el principio de separación de fases debido a la presencia simultánea de muchos óxidos (P_2O_5, V_2O_5, TiO_2, ZrO_2) y aquellos que tienen una fuerte energía de enlace en la estructura y un pequeño radio iónico (MoO_3, WO_3, Cr_2O_3).

La temperatura del vidrio en la balsa de fusión, en función de su composición, oscila de 1.250 a 1.650 ℃, en cualquier caso siempre unos 100 ℃ por encima del punto de fusión del componente más refractario. Es práctica común añadir a los componentes unas sustancias, los productos de afinado, que provoquen una gran cantidad de burbujas (que inmediatamente ascienden a la superficie, y la baja viscosidad del fundido permite su rápida evacuación) con el fin de agitar y homogeneizar el baño.

El fundido se introduce en un horno de recocido para eliminar tensiones y más tarde al horno de cristalización. Aquí el material tiene una viscosidad entre 10^{11} y 10^{12} poises, que corresponde a la temperatura a la que el flujo viscoso compensa exactamente la dilatación térmica, obtenida por medio de un ensayo dilatométrico. A esta temperatura el vidrio germina y un lento calentamiento, a razón de 5 ºC/min, permite el crecimiento de los cristales. De hecho las curvas de tratamiento son complejas, como la típica que muestra la Figura 7.52. Como es obvio, cada tipo de vitrocerámico precisa de una curva determinada.

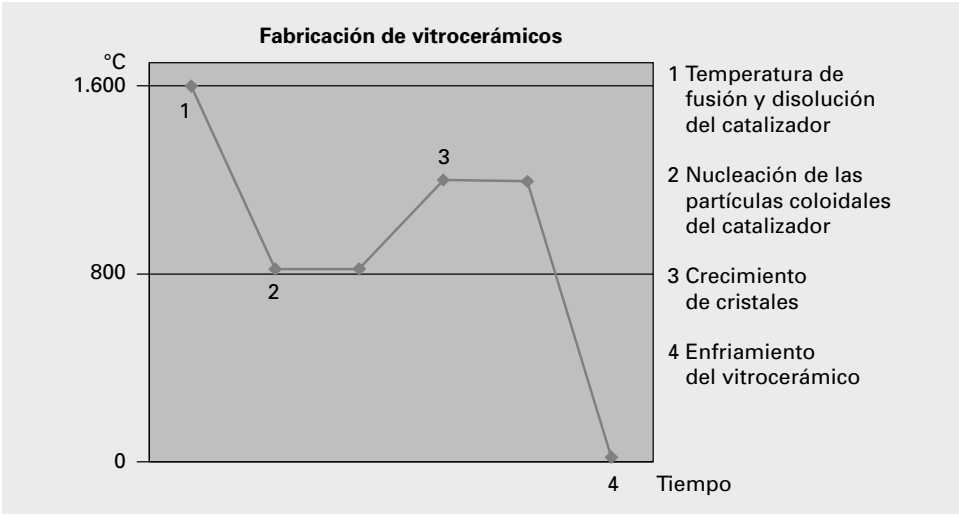


Figura 7.52. Curvas térmicas de obtención de un vitrocerámico.

Los vitrocerámicos se suelen clasificar en tres familias:

- R_2O-R_2O_3-SiO_2. Donde R (de R_2) suele ser Li o con menor frecuencia otros alcalinos. R (de R_2O_3) suele ser Al, casi nunca boro.
- RO-R_2O_3-SiO_2. Donde R puede ser Mg^{2+}, Ca^{2+}, Cd^{2+}, Mn^{2+}, Sr^{2+}. Los catalizadores suelen ser TiO_2 o P_2O_5. Los vitrocerámicos obtenidos presentan interesantes propiedades tecnológicas y electrónicas.
- R_2O-RO-SiO_2. Donde R_2 es Li, mientras que R es Mg^{2+}, Zn^{2+}, Cd^{2+}, Mn^{2+}, Ba^{2+}. Los catalizadores pueden ser Cu, Ag, Au y P_2O_5. En concreto los del tipo K_2O-CdO-In_2O_3-SiO_2, son empleados para la fabricación de barras de control del flujo neutrónico de ciertos tipos de reactores nucleares.

10.1. MICROESTRUCTURA Y PROPIEDADES DE LOS VITROCERÁMICOS

La estructura compacta microcristalina, constituida por numerosas fases cristalinas, confiere a los vitrocerámicos unas características bien particulares, entre las que destaca la ausencia de porosidad. Las dimensiones de los cristales son menores de una micra que proporciona al conjunto una notable isotropía lo que redunda en las características técnicas.

Densidad: Debido a la ausencia de porosidad la densidad de los vitrocerámicos es notablemente superior a los vidrios de los que proceden.

Estabilidad química: Es una de las principales propiedades que se persigue para el confinamiento de residuos. Salvo en casos muy especiales, la resistencia a la agresión de los agentes químicos, depende de la naturaleza de la fase vítrea residual. Teniendo en cuenta que la fase amorfa es pequeña (normalmente nula), la estabilidad química de los vitrocerámicos es elevada. Por ejemplo, vitrocerámicos de la familia MgO-Al_2O_3-SiO_2 son completamente resistentes a la acción de los gases ácidos hasta temperaturas próximas a 800 ℃. Otra ventaja es la posibilidad de conseguir que una determinada composición vítrea resistente a los ácidos pero no a la acción de las bases, se torne también resistente a la agresión alcalina cuando se convierte en vitrocerámico.

Propiedades térmicas: La propiedad más remarcable es la gama de valores del coeficiente de dilatación (α) que puede obtenerse con los vitrocerámicos. De hecho los hay con α nulos e incluso negativos. Este parámetro, como se verá, es fundamental para evaluar su resistencia al choque térmico.

El coeficiente de conductividad térmica (λ) es intermedio entre el vidrio y el correspondiente óxido puro en proporción a su cantidad relativa. En general como el cristal es predominante, la λ es elevada.

Resistencia mecánica: Es otra propiedad buscada para su empleo en la inertización y valorización de residuos. A baja temperatura, los vitrocerámicos como otros materiales cerámicos, se comportan como sólidos perfectamente elásticos hasta la ruptura. El módulo de Young (E) de la mayoría de los vitrocerámicos es mucho más elevado que los vidrios pero inferior a los óxidos puros.

La resistencia mecánica a la rotura (σ) es muy superior a los vidrios, pero no tanto como los óxidos puros.

Si se observa el termograma de la Figura 7.53 el vidrio A dilata hasta unos 450 ℃ donde alcanza la temperatura de reblandecimiento y se desmorona. Cuando, a base de tratamientos térmicos el vidrio A se convierte en el vitrocerámico A (naturalmente de la misma composición química), sus propiedades mecánicas no tienen nada que ver con el vidrio original. Así el vitrocerámico dilata hasta una temperatura superior a los 800 ℃, si bien presenta un coeficiente de dilatación mayor que el vidrio de donde procede.

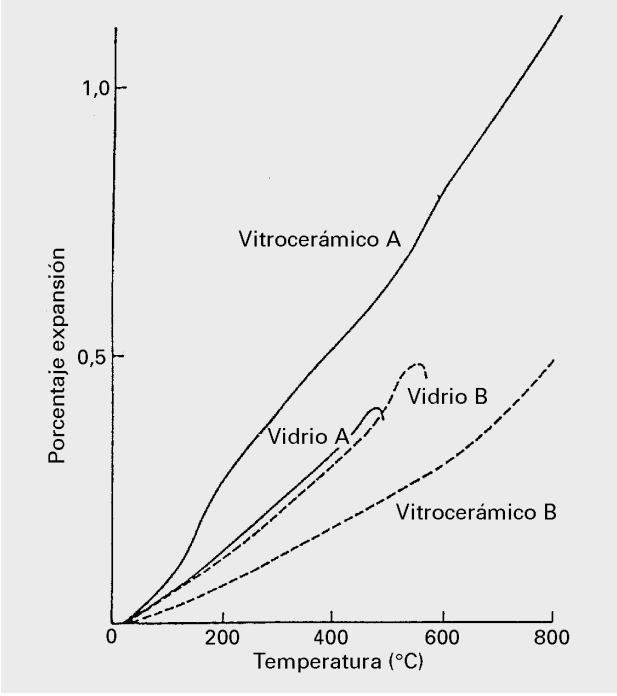


Figura 7.53. Curvas dilatométricas de un vidrio y su vitrocerámico.

10.1.1. La resistencia a la abrasión

En términos generales se define la dureza como aquel tipo de resistencia que opone un cuerpo a ser penetrado por otro. La dureza da una idea acerca de la rigidez estructural. De hecho, se pueden distinguir tres tipos de dureza de interés en los vitrificados:

- *Resistencia al rayado.* Se mide por la escala de Mohs. Los vitrificados suelen estar entre el 6 y el 7,5, mientras que los vitrocerámicos sobrepasan el 8. este método de medida no es muy fiable dado que no considera la intensidad de la presión a aplicar.
- *Indentación.* Se trata de aplicar una carga sobre el vidriado y valorar la penetración. Su medida se expresa por la relación carga/superficie y da una idea del grado de cohesión reticular (rigidez) de la estructura. Esta relacionada con la composición, la temperatura y la historia térmica.
- *Resistencia a la abrasión.* Se trata del cambio en la superficie del vidriado, ya sea por pérdida de peso o por aspecto (textura, brillo) originado por algún tipo de ataque mecánico que produce arrastre de partículas.

La dureza es una propiedad física muy compleja y raramente se hace mención a ella en términos absolutos. Así la escala de dureza de los minerales de Mohs asigna unos valores a diversos minerales de manera relativa. Con referencia a la escala de Mohs, los vitrificados, por tratarse de materiales relativamente modernos no suelen estar catalogados dentro de la clasificación clásica, no obstante ocupan un lugar destacado puesto que, por su naturaleza son materiales compuestos por cristales, la mayoría de ellos muy resistentes a la abrasión.

El ensayo aceptado internacionalmente para medir la dureza de los vidrios, vitrocerámicos o esmaltes cerámicos destinados a pavimentos, el método P.E.I. (*Porcelain Enamel Institute*) también se basa en una escala comparativa.

En la dureza el factor que influye decididamente en la resistencia a la abrasión, es la recristalización, es decir, la esencia de un vitrocerámico. Ciñéndose a la estructura de la matriz vítrea que va a dar lugar a un vitrocerámico, en líneas generales es cierto que la resistencia a la abrasión va en aumento cuando en la estructura de los óxidos que componen el flujo básico se efectúan las siguientes modificaciones:

- Eliminar el PbO.
- Aumentar o incluir en la fórmula Seger los valores de los óxidos como ZnO, LiO_2, y B_2O_3.

10.2. LA RESISTENCIA DE LOS VITROCERÁMICOS AL CHOQUE TÉRMICO

El choque térmico estudia los efectos mecánicos que puede producir un gradiente de temperatura importante, crítico o admisible, entre la superficie y el núcleo de la pieza. Esta característica es fundamental en la aplicación de los vitrocerámicos a la industria, la construcción y el comercio. Por ejemplo, los materiales destinados a placas de calentamiento en cocinas, o los muros cortinas (empleados

en fachadas de edificios) deben soportar el choque térmico sin problemas. Es obvio que ello tendrá también una aplicación directa a la producción de vitrocerámicos para el confinamiento de residuos nucleares.

La resistencia al choque térmico de un material es una propiedad en que intervienen una serie de parámetros ya estudiados. El gradiente térmico máximo admisible (Δt), para que no se produzca rotura por choque térmico, depende de una serie de factores que le afectan directa o indirectamente.

De manera directa: La resistencia mecánica (σ), cuanto más alta, mejor comportamiento al choque térmico. La porosidad, sobre toda la abierta, reduce mucho la resistencia mecánica.

El otro factor es la conductividad térmica (λ), a mayor λ, mejor resistencia al choque térmico.

De manera indirecta: Los factores más obvios son que el espesor de la pieza (e) sea reducido, así como la tasa de transferencia de calor (h, en Kcal/$m^2 \cdot h \cdot {}^oC$). En la fórmula intervienen otros parámetros: E: módulo de elasticidad. En los materiales cerámicos, pequeñas deformaciones producidas por la temperatura, originan grandes esfuerzos, luego cuanto mayor sea E más facilidad de rotura por choque térmico. En el cálculo teórico se utiliza el módulo transversal (μ), que suele valer una cuarta parte de E. Cuanto menor sea el coeficiente de dilatación térmico (α) mejor será el comportamiento al choque térmico.

La expresión matemática que proporciona el valor del gradiente máximo admisible (Δt) es del tipo:

$$\Delta t = k \cdot \frac{\sigma \cdot (1-\mu) \cdot \lambda}{\alpha \cdot E \cdot e \cdot h}$$

Es fácil observar que en los materiales vitrocerámicos σ y λ tienen valores elevados, mientras que E y α son reducidos. Todo ello son características que potencian la resistencia al choque térmico, de ahí que la aplicación de los vitrocerámicos al campo de la inertización de residuos, en especial los nucleares, tome cada día mayor relevancia.

En los últimos años se ha trabajado mucho en la obtención de vitrocerámicos, a partir de residuos, dado que presentan grandes posibilidades de utilización. Principalmente atendiendo a dos de sus principales características: la gran resistencia al ataque de los ácidos y el inmejorable comportamiento al choque térmico.

10.3. VÍAS DE PRODUCCIÓN DE VITROCERÁMICOS

Las dos grandes vías de fabricación de vitrocerámicos son:

- La vía petrúrgica.
- El proceso vitrocerámico.

La primera, la vía petrúrgica es la más comúnmente empleada para la fabricación de materiales vitrocerámicos a partir de materias primas naturales (rocas, minerales) o residuos (escorias, polvos). Suelen ser fundidos silicatados, con bruscos cambios de viscosidad en intervalos de temperatura muy reducidos, lo que determina una tendencia a la desvitrificación, típica de los vidrios aptos para su moldeo por colado. En general el proceso es como sigue: fusión, homogeneización del liquido, colado (sobre moldes) y ciclos de enfriamiento lentos para potenciar la desvitrificaciób n de las fases cristalinas mayoritarias.

El proceso vitrocerámico consiste en provocar la desvitrificación en un vidrio, previamente obtenido mediante tratamientos de nucleación y cristalización controlados (cristalización secundaria de un vidrio). Esta vía es la seguida para la obtención de la mayoría de los materiales vitrocerámicos comercializados fabricados a partir de materias primas puras o de síntesis.

En ambos procesos, vitrocerámico y petrúrgico, es usual la adición de agentes nucleantes en las composiciones originales para favorecer la nucleación, sobre todo en aquellos sistemas que dan lugar a vidrios muy estables y, por lo tanto presentan una baja tendencia a la desvitrificación.

10.3.1. Clasificación de los vitrocerámicos

Según la naturaleza de las materias primas utilizadas en la fabricación de vitrocerámicos, estos pueden clasificarse en:

- *Vitrocerámicos técnicos*. Son generalmente blancos y se obtienen a partir de materias primas utilizadas en la fabricación de los vidrios comunes comerciales. Se agrupan según el componente mayoritario sea Li, Mg, B, Ba, etc. Es frecuente la adición de otros óxidos para potenciar diversas propiedades.
- *Vitrocerámicos para usos arquitectónicos de tipo petrúrgico.* La materia prima esta constituida, esencialmente, por rocas, minerales o

mezcla de ambos y pueden obtenerse incluso por procesos de sinterización. En el caso de los pavimentos desarrollados con rocas volcánicas, las prestaciones técnicas son muy superiores a las del gres porcelánico.

- *Vitrocerámicos para usos industriales.* En esta clase es donde se usan los residuos industriales, básicamente escorias y otros residuos de la industria metalúrgica, cenizas volantes de centrales termoeléctricas y otros subproductos.

10.3.2. Esmaltes vitrocerámicos empleados en la industria cerámica

Cada vez existe mayor interés en desarrollar esmaltes vitrocerámicos para aplicar a los pavimentos y sustituir de esta manera a los vitrificados convencionales, son los denominados «vidriados y esmaltes avanzados». Así, estos se pueden definir como un elemento vitrificado que se aplica a la superficie de un soporte cerámico para potenciar todas las propiedades, químicas y físicas, propias de estos materiales.

La naturaleza de los vidriados cerámicos es compleja y se pueden distinguir:

- Vidrio o fase vítrea que forma la matriz estructural que, a su vez puede ser homogénea o heterogénea cuando se producen separaciones de fases debido a la formación de vidrios insolubles.
- Nanocristales, o fases cristalinas cerámicas producto de la desvitrificación del vidrio. Los tamaños pueden oscilar entre 500 y 2.000 nm.
- Microcristales. Se trata de cristales cerámicos que se añaden a la formulación del esmalte y, al ser insolubles, aparecen en el material cocido (el caso más representativo son los cristales de corindón).
- Burbujas, también denominada porosidad.

Los esmaltes vitrocerámicos tratan de potenciar la fase de desvitrificación para originar los nanocristales. Así, a partir del sistema SiO_2-CaO-ZnO cuando se le añade ZrO_2, desvitrifica circón en forma de estructura homogénea, con cristales aciculares de 1-4 mm, de elevada blancura y gran resistencia a la abrasión. Cuando se le añade MgO aumenta la microdureza y la tenacidad, por desvitrificación del piroxeno diópsido $CaMgSi_2O_3$.

Las fritas ricas en SiO_2 en el sistema vitrificante SiO_2-CaO-ZnO-Al_2O_3 aplicadas en capas de 2 μm, desvitrifican y proporcionan unas características de transparencia y brillantez, a la par que presentan una elevada resistencia mecánica y al rayado. La introducción del TiO_2 como agente nucleante favorece la desvitrificación y conversión del SiO_2 en cristobalita, estabilizando esta fase cristalina frente a la tridimita.

A partir del sistema SiO_2-CaO-Al_2O_3 en la región de estabilidad de la anortita ($CaAl_2Si_2O_8$) presenta propiedades importantes cuando se le añade Nb_2O_5 por encima de los límites de solubilidad y se forma fersmita ($CaNb_2O_6$), la dureza aumenta en un 33%, llegando a los 665 kg/mm^2.

10.4. RESIDUOS EMPLEADOS EN VITROCERÁMICOS

Dentro del mundo de los residuos, los que presentan mayores posibilidades de ser usados como materia prima para la obtención de vitrocerámicos son:

- Las rocas volcánicas, en particular las basálticas.
- Ciertos residuos industriales, básicamente escorias y otros residuos de la industria metalúrgica y cenizas volantes de centrales termoeléctricas.

En el primer caso, residuos de rocas volcánicas, la composición química de la roca debe ser tal que sea capaz de dar lugar a la formación de vidrios susceptibles de ser desvitrificados estructurando fases que permitan la posibilidad de sustitución isomórfica. Ello lo cumplen las rocas con composiciones semejantes a los piroxenos, ya que es un mineral que facilita resistencia a la abrasión, durabilidad química y resistencia mecánica. Por otra parte, las posibilidades de empleo, por la vía petrúrgica, se acrecientan si en la composición química intervienen elementos que puedan actuar como agentes nucleantes en el proceso de desvitrificación. La Tabla 7.46 reproduce el análisis químico y mineralógico (cualitativo) de diversos basaltos de las islas Canarias (España).

La presencia de elevado porcentaje de TiO_2, óxidos de hierro y P_2O_5, todos ellos de acción nucleante e influyente en el desarrollo cristalino, permite la desvitrificación. Por otra parte la mineralogía expuesta, con presencia de piroxenos, favorece la formación de las estructuras buscadas.

También se han formulado esmaltes cerámicos de basalto, que proporcionan un intenso color negro, a base de preparar una mezcla del 80% de basalto, 19% de caolín y 1% de bentonita. Estos dos últimos minerales (propiamente minerales de arcilla)

Tabla 7.46. Análisis químico y mineralógico de rocas volcánicas

A. químico	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
SiO2	49,7	50,3	49,1	43,1
TiO2	2,63	2,29	2,63	4,27
Al2O3	14,15	14,15	13,70	11,10
Fe2O3	7,38	6,36	7,21	7,02
FeO	4,6	4,01	4,60	7,47
MnO	0,15	0,14	0,16	0,18
MgO	7,82	7,74	8,74	11,50
CaO	9,84	9,67	10,12	11,09
Na2O	3,27	3,21	3,12	2,89
K2O	0,75	0,78	0,81	1,10
P2O5	0,29	0,44	0,43	0,58
Mineralogía				
Piroxeno	X	X	X	X
Olivino	X	X	X	X
Hematites	X	X	X	
Ilmenita	X		X	
Plagioclasa	X	X	X	X
Sanidina			X	X
Nefelina	X		X	

se emplean como agentes que mantienen la mezcla en suspensión para evitar la sedimentación.

Otro ejemplo emblemático es la fabricación de vitrocerámicos a partir de residuos de la gasificación de carbón (escorias IGCC), cascote de vidrio y carbonato cálcico. La mezcla se funde a 1.450 ℃ y posteriormente se somete a un proceso de desvitrificación controlada. Los análisis de difracción de rayos-X muestran, en las probetas obtenidas a partir de 900 ℃, la presencia de wollastonita ($SiCaO_3$), anortita ($Si_2Al_2CaO_8$) y gehlenita ($SiAl_2Ca_2O_7$): fases cristalinas bien desarrolladas.

11. Aspectos técnicos y económicos ligados a la vitrificación

La incorporación de nuevos sistemas de vitrificación a la inertización de residuos, como los hornos de capa fría, los hornos eléctricos de arco o de plasma, ha hecho recelar de la viabilidad económica de la vitrificación. Los dos sistemas citados en último lugar son muy costosos de adquisición y de explotación y la calidad del material obtenido no difiere sustancialmente de los conseguidos por los métodos tradicionales.

Desde el punto de vista de rendimiento energético el coste de la unidad de calor dependerá del país y de la cantidad de energía consumida. En el caso de España un Kw · h eléctrico puede costar de media 0,090 €. Mientras que si se trata de gas natural el precio cae a 0,023 €/kw · h (0,23 €/th). Naturalmente la energía eléctrica se aprovecha íntegramente mientras que la calorífica presenta pérdidas muy elevadas ya que emite gases a la atmósfera a la misma temperatura que la de fusión.

Desde la óptica ambiental la fusión eléctrica es claramente favorable ya que no genera gases que deberán ser depurados. No obstante las elevadas temperaturas a las que trabajan los hornos eléctricos provocan una mayor volatilización de metales (a excepción de los hornos de «capa fría») con lo que, parte de los beneficios obtenidos se ven diluidos.

11.1. COSTE DE VITRIFICACIÓN. SISTEMA ELÉCTRICO Y DE GAS

Desde el punto de vista energético los procesos de fusión de materiales inorgánicos son caros ya que debe alcanzarse una temperatura elevada en el baño y los gases han de abandonar el horno a alta temperatura. Sin embargo la naturaleza de los residuos, o materiales a fundir, no tiene gran relevancia ya que el calor de fusión es despreciable frente a los otros términos del balance térmico.

Una estructura típica de un balance térmico para la fusión de cenizas volantes de incineradora de RSU con la aportación de cascote de vidrio puede tener un consumo de 1,6 kW · h/kg (o bien 1.376 kcal/kg) de material producido.

En la Tabla 7.47 se exponen los principales parámetros elegidos para llevar a cabo la comparación.

Tabla 7.47. Datos de partida para la evaluación económica de los sistemas de fusión

DATOS BÁSICOS PARA LA EXPOLOTACIÓN		
Coste de la termia de GN		0,0270 €/th
Coste de kw · h		9,0902 €/kw · h
Relación coste «electricidad/gas»		3,88
Coste del k · w, autogenerado con GN		0,0672 €/kw · h
Nueva relación «electricidad/gas»		2.89
Vertido (polvos filtro		200 €/t
DEPURACIÓN EN EL FRITADO CONVENCIONAL		
Material particulado	Si	Filtro de mangas
HF y HCl	Si	Lechada de cal
Metales	Si	Adsorción en CA
NO_x	Si	Con NH_3
CO	No	

Como se desprende de la tabla anterior la relación entre la unidad de energía eléctrica y térmica, en unidades homogéneas, es de 3,88. En otras palabras para que la partida correspondiente a combustible fuese la misma, significa que el consumo específico del horno eléctrico debería ser 3,88 veces inferior al de gas. Principio que solo se cumpliría para grandes producciones, propias de hornos de vidrio, pero no en el caso de pequeños vitrificadores u hornos de fritas. Tampoco hay que especular con la posibilidad de reducción del coste eléctrico, ya que España es uno de los países de la UE menos diversificada en la obtención de la energía eléctrica, a no ser que se promocione de manera seria y decidida las energías renovables tanto la eólica como la procedente de la biomasa.

Otra posibilidad consiste en autoproducirse la electricidad a partir de un grupo motogenerador a gas. Teniendo en cuenta el precio indicado de la termia de gas, la autogeneración con un rendimiento del 40%, reduciría la relación «electricidad/gas» a 2,89. Con esta relación la economía de combustible juega a favor del horno eléctrico para cualquier producción. La Tabla 7.48 muestra los consumos unitarios para ambos tipos de hornos.

Tabla 7.48. Consumos específicos comparados

CONSUMOS UNITARIOS		
	kcal/kg	**kw/kg**
Horno de gas	2.687	3,125
Horno eléctrico	701	0,815
Relación de consumo horno gas/eléctrico	3,83	

No obstante los costes derivados de la depuración de gases son los que, al margen de la relación «electricidad/gas» equilibran el sistema y lo decantan hacia el sistema eléctrico. Como muestra la Tabla 7.49 la diferencia de explotación es del orden del 3%, teniendo en cuenta que con el sistema de combustión convencional no se valora lo siguiente:

- Pérdida anual de frita que, para el caso presente puede evaluarse en un porcentaje elevado del material particulado emitido a la atmósfera.
- Emisiones de monóxido de carbono. Que es imposible de proceder a su valoración económica.

Tabla 7.49. Comparación costes totales de explotación

COSTES DE EXPLOTACIÓN			
Tipo de horno	**Gas**	**Eléctrico**	
Coste combustible	1.193.765	1.206.806	€/año
Costes mantenimiento	37.864	34.643	€/año
Reactivos depuración	23.231	—	€/año
Vertido polvos	36.005	—	€/año
Explotación depuración	40.302	—	€/año
Total	1.331.166	1.241.449	€/año

Con ello los costes comparados de explotación finales aparecen en la Tabla 7.50. En ella se ha valorado el coste de la materia prima solo la parte correspondiente al material que se emite a la atmósfera en forma de material particulado) que no se aprovecha como frita vendible pero si se paga en forma de materia prima.

Tabla 7.50. Costes totales de explotación

COSTES TENIENDO EN CUENTA LA FRITA PERDIDA			
Tipo de horno	**Gas**	**Eléctrico**	
Costes explotación	1.331.166	1.241.449	€/año
Material particulado	156.366	—	kg/año
% Aprovechable	70		
Frita «recuperable»	109.456	—	kg/año
Precio medio frita	0,60	—	€/año
Valoración frita	65.784	—	€/año
Coste explotación final	1.396.951	1.241.449	€/año

Por lo tanto, cuando se tienen en cuenta todos los factores, los costes comparados de explotación, sin valorar los factores comunes como la mano de obra o el embalaje, se concluye, como indica la Tabla 7.51, que la fusión eléctrica es favorable también desde la óptica económica.

A título de epílogo. Por regla general los materiales vitrificados no generan ningún tipo de problema en cuanto a la lixiviación. Cuanto más elevada es la temperatura de vitrificación y más numerosos y variados son los cationes presentes a inertizar, más fuertes suelen ser los enlaces químicos en el vidrio y, como consecuencia, menos problemas de lixiviado.

Tabla 7.51. Coste unitario de explotación comparado

COSTE UNITARIO DE EXPLOTACIÓN	
Producción anual (horno gas)	16.268.634 kg/año
Peoducción anual (horno eléctrico)	16.425.000 kg/año
Coste unitario horno gas	0,0859 €/año
Coste unitario horno eléctrico	0,0756 €/año

12. Aplicación de la vitrificación al tratamiento de sedimentos

Los sedimentos fluviales se acumulan en las orillas de las masas de agua a lo largo de su cauce y una gran parte del material en suspensión llega a desembocar a los lagos y mares incrementando la formación de sedimentos marinos y lacustres. Se debe resaltar además que gran parte de los sedimentos marinos se forman por la deposición gradual de material orgánico e inorgánico proveniente de organismos vivos (cadáveres y desechos), que a su vez pueden ser trasladados por la actividad de las olas desde lugares profundos a los menos profundos cercanos a las orillas o a depresiones naturales en el fondo marino. Otra fuente importante de sedimentos en las costas con poblaciones grandes en su entorno proviene del depósito y vertido de residuos en aguas marinas.

Las Directivas Europeas 2006/11/CE y la 2000/60/CE determinan que para el análisis de aguas superficiales y subterráneas, los sedimentos y muestras de fondo de río se deben analizar 69 compuestos contaminantes orgánicos prioritarios, así como metales (mercurio y metilmercurio, cadmio, plomo, cromo, níquel, arsénico, selenio cobre y zinc).

Una muestra de contaminante orgánico en sedimentos lo constituyen los polibromodifeniléteres (PBDEs), que son compuestos retardantes de llama que se empezaron a utilizar en sustitución de los más contaminantes PCBs, se pueden encontrar en gran variedad de aplicaciones sobre plásticos, textiles, circuitos electrónicos y otros materiales. Su producción entre los años 1990 y 2000 pasó de las 145.000 a las 310.000 toneladas anuales. En muestras de peces y sedimentos analizados en varios puntos del río Ebro (España) muestran altos niveles de contaminación por PBDEs.

Los fármacos se constituyen en el grupo de contaminantes emergentes más importante ya que se desconoce al alcance real de su posible impacto y acumulación en los sedimentos, aunque si se sabe de casos puntuales de compuestos empleados en los analgésicos (ibuprofeno, diclofenaco, indometacina, ketoprofeno), antidepresivos (diazepam), antiepilépticos, antisépticos (triclosán) y aditivos de gasolina (MTBE y compuestos similares); que pueden afectar directamente a especies de flora y fauna acuática causando desequilibrios en el ecosistema natural. El problema se agrava si se tiene en cuenta que muchos de estos compuestos difícilmente se extraen del agua residual urbana en las depuradoras, llegando así al cauce de los ríos y/o desembocando al mar para acumularse finalmente en los sedimentos.

En el año 2004, se dragaron en todos los puertos españoles unos 9,6 millones de m^3 en primer establecimiento y unos 2,1 millones de m^3 en tareas de mantenimiento. De estos 11,7 millones de m^3 dragados, se vertieron en las costas españolas 2,8 millones de m^3, el resto se depositó en aguas más profundas lejos de los puertos. Sin embargo estas cifras dan idea de la magnitud del problema.

A lo largo de 70 años el conglomerado de industrias agrupadas en la localidad de Flix (Tarragona, España) ha ido vertiendo toda clase de residuos al río Ebro. En los años 60 con motivo de la construcción de la presa de mismo nombre, el vertido prosiguió, pero, obviamente se fueron acumulando como sedimentos en el fondo del embalse y la problemática ambiental no saltó a la opinión pública hasta 2005 cuando la situación creada era grave e irreversible.

La Figura 7.54 muestra la forma de extracción de los sedimentos, previa construcción de una barrera artificial compuesta de bloques de hormigón para facilitar la tarea de extracción sin remover mucho el resto de agua del embalse. Se ha comprobado que cuando hay episodios de grandes avenidas y se tiene que desembalsar cantidades importantes de agua, el río, aguas abajo de la presa, baja muy contaminado.

12.1. CANTIDAD Y NATURALEZA DE LOS SEDIMENTOS ACUMULADOS

La parte más importante de los sedimentos provienen de rocas de fosforita (que suele contener uranio en forma natural) con un elevadísimo contenido en lutita. Éste es un mineral compuesto básicamente por cuarzo, filosilicatos y hematites. El resto, como se expone seguidamente, son básicamente contaminantes.

La lutita es un mineral perfectamente valorizable. De ahí que, empleando una tecnología apropiada se pueda aprovechar íntegramente. También es preciso establecer un foro de discusión sobre la noción de inertización y la idoneidad de aplicación de diversas tecnologías para tratar estos sedimentos.

12.1.1. Aspectos cualitativos de los sedimentos. Evaluación de la carga contaminante

Según estimación del estudio realizado, en 2002, por el CSIC (Consejo Superior de Investigaciones Científicas) y la UAB (Universidad Autónoma de Barcelona), los sedimentos contienen:

- Sedimentos y residuos inorgánicos 93,78396%
- Fracciones orgánicas 6,12076%
- Metales pesados y radionúcleos 0,09184%
- Compuestos organoclorados 0,00344%

Tratamiento recomendado según caracterización: Los tratamientos recomendados, en función de las partidas aparecidas en los diferentes estratos, deberían ser:

- Sedimentos y residuos inorgánicos (según estrato y nivel de contaminación): Vitrificación/Ceramización/Clínquerización.
- Fracciones orgánicas: Oxidación térmica.
- Metales pesados y radionúcleos: Vitrificación (excepto Hg).
- Compuestos organoclorados: Oxidación térmica.

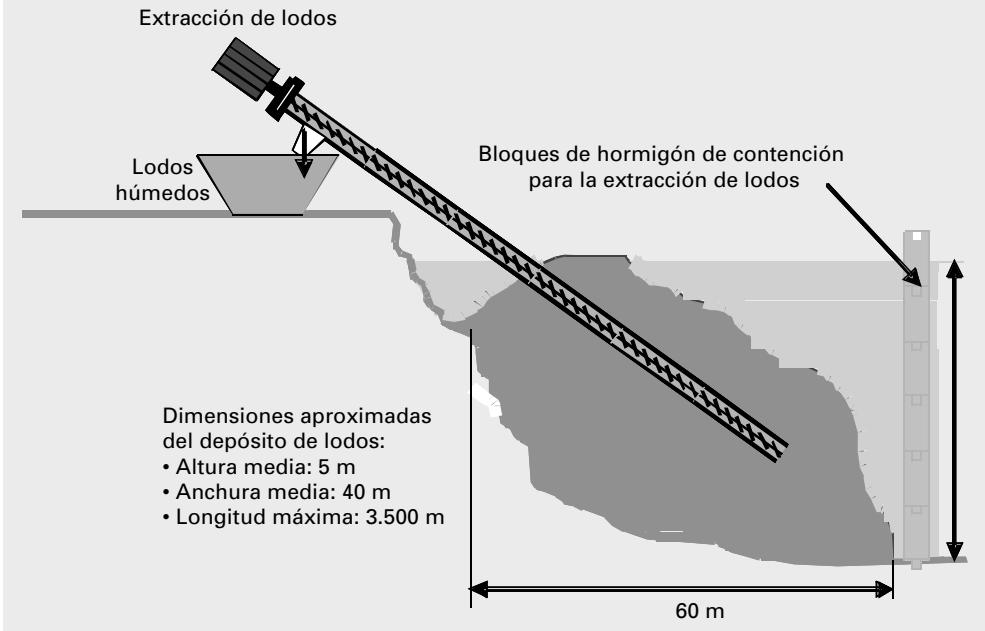


Figura 7.54. Estructura del sedimento en el embalse de Flix.

La Universidad de Valencia y la Universidad Politécnica de Valencia (España) reportan en 1972 los primeros resultados de investigaciones sobre la contaminación en aguas y lodos en La Albufera (Parque Natural de la Albufera declarado parque nacional por el gobierno valenciano en 1986 que se encuentra situado a unos 10 km al sur de la ciudad de Valencia, España). En los estudios más recientes (2005) se realizó un muestreo intenso sobre un total de 98 puntos repartidos en el área de la laguna del parque y se detectó un elevado nivel de contaminación. Los parámetros de contaminación analizados fueron:

- Metales pesados.
- Presencia de pesticidas organoclorados.
- Presencia de PCBs.
- Hidrocarburos policíclicos.
- Análisis de toxicidad. Técnica recomendada por la USEPA.

Tabla 7.52. Clasificación de los materiales dragables por su contenido en contaminantes expresado en µg/Kg. (CEDEX)

Nivel de acción	Hg	Cd	Pb	Cu	Zn	Cr	As	Ni	∑PCBs
NA1	0,6	1,0	120	100	500	200	80	100	0,03
NA2	3,0	5,0	600	400	3.000	1.000	200	400	0,1

Con los datos obtenidos en los muestreos se puede calcular el «Índice de Contaminación Acumulada» ICA (o AAPI según CEDEX) mediante la siguiente fórmula (modificada por Peris Mora & col. 2003):

$$ICA = AAPI = \frac{Hg}{0,6} + \frac{Cd}{1} + \frac{Pb}{120} + \frac{Cu}{100} + \frac{Cn}{500} + \frac{Cr}{200} + \frac{As}{80} + \frac{Ni}{100} + \frac{\sum PCBs + \sum OCPs}{0,03}$$

Este polinomio da una idea de un índice de contaminación en sedimentos que, a su vez, dará lugar a un nivel de acción por parte de las autoridades competentes para actuar sobre los sedimentos.

12.1.2. Aspectos cuantitativos de los sedimentos

Según estimación del estudio realizado por el CSIC y la UAB, la cantidad total de lodos (base seca) era de 300.000 t. Si bien las últimas estimaciones, llevadas a cabo por ACUAMED (Empresa perteneciente al Ministerio de Medio Ambiente), prevén una cantidad doble de la indicada. En 2004 y 2005, este autor presentó un documento técnico y económico a la Generalitat, al ayuntamiento de Flix y a ACUAMED, que se basaba en los siguientes parámetros:

- Periodo de tiempo para el tratamiento 5 años
- Capacidad anual de tratamiento 60.000 t/año

En el documento, después de justificar su idoneidad técnica y ambiental, se defendía la valorización como filosofía de tratamiento y se facilitaban costes de explotación.

12.1.3. Problemática inherente al tratamiento de los sedimentos

Las partidas más significativas a destacar, en el caso del pantano de Flix, son:

1. Sedimentos y residuos inorgánicos.
2. Fracciones orgánicas distribuidas al azar.
3. Metales pesados, alguno de ellos volátil (Hg).
4. Compuestos organoclorados.
5. Radionúcleos.

En realidad, hasta la fecha (2005), no se conoce la distribución de estas fracciones en los diversos estratos sedimentados.

12.2. PROBLEMÁTICA AMBIENTAL ASOCIADA A LOS LODOS SEDIMENTADOS

Para abordar el desarrollo de este estudio se da por descontado que el proceso de tratamiento de los lodos será:

- Extracción.
- Deshidratación mecánica y secado.
- Tratamiento térmico. Básicamente por pirólisis. Es decir un proceso térmico que permita la extracción de la fracción orgánica del lodo para convertirla en energía. El proceso, inevitablemente dejara un residuo secundario, la ceniza.
- Tratamiento y valorización de la ceniza. Naturaleza y tratamiento más adecuado.

Durante la conversión energética se supone que se ha destruido toda la materia orgánica, o sea que en principio no debería tenerse en cuenta ya que la ceniza debe estar exenta de materia orgánica. Esta aseveración no es cierta puesto que en el preceptivo tratamiento de gases existe la reformación de ciertos organoclorados que deben abatirse, adsorberse, con carbón activo (también materia orgánica).

En resumen, la ceniza que solo está compuesta, mayoritariamente, de materia inorgánica y las sales resultantes del proceso de neutralización de las aguas ácidas, también tienen una fracción si bien muy reducida de materia orgánica que deberá tenerse muy en cuenta a la hora de elegir un sistema de tratamiento final.

12.3. DISTINTOS MÉTODOS DE TRATAMIENTO DE LOS LODOS PROCEDENTE DE SEDIMENTOS

Aunque sea de manera general, en los apartados posteriores se describen las ventajas e inconvenientes de los diversos sistemas de tratamiento que pueden aplicarse a los lodos, en adelante denominados cenizas, procedentes de los tratamientos térmicos:

- Depósito en vertedero.
- Tratamiento fisicoquímico.
- Encapsulación en mezclas bituminosas.
- Valorización en cementera.
- Valorización cerámica.
- Valorización por vitrificación.

Esta descripción servirá, posteriormente, para entender los costes asociados a cada tipo de tratamiento.

12.3.1. Vertido de sedimentos

El vertido directo de estos lodos, aunque sean deshidratados no es posible, debido a su caracterización tanto química como física. Si, momentáneamente alguna Comunidad Autónoma permitiera el vertido lo debería hacer exigiendo un pretratamiento. No obstante, en poco tiempo lo restringiría drásticamente por una serie de motivos:

- Los costes de vertido se incrementan año tras año, aunque todavía se hallan a mucha distancia de los precios que pagan países de nuestro entorno. El aumento de costes obedece tanto a limitaciones de espacio (es el caso de Cataluña o centro Europa) como a la paulatina adecuación de los vertederos a las normas vigentes.
- Los costes derivados de los pretratamientos que en un futuro será necesario llevar a cabo en los fangos y lodos antes de su vertido.

A título de ejemplo y comparación, un residuo algo similar a estos sedimentos como los fangos de EDAR secos se pueden verter en algunos países de la UE. Así, en nuestro país vecino, Francia, el coste de vertido es superior a 100 €/t, sin contar el transporte. En otros países, como Suiza, hace años que se ha prohibido el vertido de fangos, en Austria lo han prohibido recientemente y en los Países Bajos lo harán próximamente.

Como conclusión debe extraerse que, si bien este tipo de residuos secos pueden ser depositados hoy en día en vertederos, las cenizas resultantes de su tratamiento térmico, realmente semejantes a sedimentos, no es posible verterlos sin pretratamiento.

12.3.2. Tratamiento fisicoquímico

Este conjunto de tratamientos también se denominan de estabilización/solidificación y se consideran, para el caso presente, como un paso previo para el depósito en vertedero.

La estabilización consiste en la fijación química de los contaminantes que pueda contener un residuo. La solidificación es un conjunto de diversas técnicas que permiten mejorar el manejo y características físicas del residuo. En la mayoría de países no se permite la entrada en el vertedero de residuos con una humedad superior al 65%. Incluso por debajo de este umbral hay materiales que tienen consistencia líquida y es preciso «solidificarlos» para su manejo. Así la técnica más corriente es la mezcla del residuo con cemento.

En general estas tecnologías consisten en el empleo de sustancias floculantes para conseguir la sedimentación, concentración, prensado, etc., de las fracciones precipitantes. El coste de este proceso tiene que ver básicamente con:

- La adición de cal/cemento.
- La manipulación.
- El vertido.

La incidencia del coste del vertido es esta modalidad es muy importante.

12.3.2.1. La acción del cemento Portland

El modo de tratamiento de estabilización/solidificación (E/S) más común se consigue a base de mezclar el residuo con cemento Portland. En función del tipo de sedimento sería recomendable usar cemento aluminoso.

Las reacciones de hidratación (fraguado) son exotérmicas y generan una temperatura de 30-40 ℃. Por tanto, habrá que prestar atención a los compuestos orgánicos volátiles presentes en los residuos y/o sedi-

mentos. La USEPA reglamenta y restringe la inertización por esta tecnología para los residuos que contengan compuestos orgánicos volátiles o semi-volátiles.

Sin embargo, el principal problema de esta tecnología son los efectos negativos que producen los numerosos compuestos presentes en los residuos durante las reacciones de hidratación y fraguado. De hecho existe un conjunto de reacciones, además de las citadas, como son las reacciones de hidrólisis, procesos de oxidación, procesos de reducción y formación de nuevos compuestos. El problema principal radica en que la composición del residuo puede cambiar de repente con unas consecuencias imprevisibles. La Tabla 7.53 muestra unos cuantos ejemplos.

Tabla 7.53. Tratamiento de estabilización y solidificación

Efecto de los compuestos orgánicos en la S/E	
Compuesto	Efecto
Semivolátiles o HAP's	Interfieren el enlace residuo-cemento.
Aceites y grasas	Forman enlaces débiles (Poca resistencia).
Fenoles	Disminuyen la resistencia a la compresión.
Carbón, lignito	Problemas en fraguado y compresión.
Grasas, aceites, PCB's, HAP's	Pueden impedir el fraguado.
Alcoholes, fenoles, ácidos orgánicos, etc.	Retardan el fraguado. Mala durabilidad.
Orgánicos clorados	Retardan el fraguado. Mala durabilidad
Hidrocarburos alifáticos	Aumentan el tiempo de fraguado

Es evidente que algunos de los compuestos citados en la tabla anterior están presentes en los lodos del sedimento.

12.3.2.2. La acción de la cal

Tradicionalmente la cal ha sido usada, en el campo del tratamiento de residuos, para neutralizar las aguas residuales ácidas y precipitar los metales antes de la descarga. Más recientemente se está usando en los procesos de E/S para residuos con aceites y alquitranes así como con otros residuos orgánicos.

La elevada superficie específica (por esto es necesario una gran finura) de la cal le confiere un gran poder de adsorción de muchos productos orgánicos. La acción más importante buscada en el proceso es la carbonización que hace las veces de una matriz que atrapa los diferentes compuestos. La técnica más novedosa es el denominada «cal modificada». Este proceso se ha desarrollado en particular para estabilizar y tratar residuos orgánicos. Al igual que con el cemento Portland, este proceso es muy exotérmico y el calor generado propicia la volatilización de COV's.

Otros aditivos usados son los que se basan en puzolanas (cenizas volantes y silicatos) y arcillas. Dentro de los silicatos el aditivo más empleado es la sílice amorfa (micro sílice o «*silica fume*»). Su estructura amorfa propicia una gran superficie específica, del orden de 25 m^2/g y por lo tanto se convierte en un reactivo muy adecuado tanto para el cemento como para la cal. En el caso de los metales su acción consiste en mejorar la inmovilización.

12.3.2.3. Conclusiones a los tratamientos de E/S para cenizas

Debe entenderse que los procesos de E/S aplicados al tratamiento de los lodos y/o cenizas de su proceso lo son en cuanto a tratamientos previos al vertido puesto que la inmovilización de los compuestos peligrosos no está en absoluto asegurada.

Al igual que las cenizas volantes procedentes de la incineración de RSU, deberían ser tratadas con cemento aluminoso, encerradas en big-bags de plástico bien sellados y transportados a un depósito de seguridad, circunstancia inimaginable en el caso de los sedimentos debido a la gran cantidad a tratar.

12.3.2.4. Empleo de cenizas como materia prima para prefabricados de hormigón

Se trata de formular un hormigón para fabricar prefabricados usando como materia prima las cenizas resultantes de los procesos térmicos de los sedimentos.

Para valorar las cualidades del proceso es preciso analizar los factores que afectan de manera directa a la fijación y prevención de la lixiviación de los contaminantes que se hallan en relación directa con:

- La gran superficie específica de la base C-S-H que permite la absorción y la adsorción de iones.
- La elevada alcalinidad que permite la precipitación de los hidróxidos insolubles.
- La posibilidad de incorporar sustancias en el retículo cristalino de las fases de dos componentes.

De hecho el fenómeno de la interacción y/o reacciones que tienen lugar durante el fraguado son muy complejas y van desde la pura encapsulación a la reacción química, la adsorción, la quimisorción, absorción, etc.

La degradación es un fenómeno de destrucción paulatina de la estructura del hormigón que obedece a diversas causas o combinación de ellas como: difusión de agentes agresores a través de reacciones en estado sólido, cristalización de fases, reacciones químicas, adsorción de iones químicamente muy activos y lixiviación.

La portlandita es la fase más soluble de todas las formadas en el fraguado. Por ello cuando se prevea una determinada condición de trabajo en la que sea fácil el contacto con líquidos agresivos, será preciso limitar la cantidad de esta fase.

La fuerte alcalinidad de los hormigones los hace especialmente resistentes a la agresión de los organismos vivos, ya que la actividad biológica es incompatible con pH muy alto o muy bajo.

12.3.2.5. Conclusiones a los tratamientos de E/S de las cenizas a base de prefabricados

El cromo hexavalente (VI) presente en los cementos comerciales es el causante de efectos nocivos en las personas que los manipulan, alergias en contacto con la piel, dermatitis, irritaciones del aparato respiratorio, bronquitis, sinusitis, etc., si es inhalado. Pero también lo es para el medio ambiente. El Cr(VI) es una especie tóxica y está considerada como cancerígeno potencial por la Organización Mundial de la Salud. Se sabe que la cantidad de cromo en el cemento, así como su valencia y solubilidad son decisivas para que se produzca la sensibilización de la piel. El cromo trivalente, Cr (III), aunque más nocivo que el hexavalente, produce menos problemas de dermatitis debido a su escasa solubilidad y capacidad de penetración en la piel.

Para regular la cantidad de Cr (VI) permitida, la UE ha dictado la Directiva 2003/53/CE, en la cual se prohíbe el uso y comercialización de cementos cuyo contenido en Cr (VI), una vez hidratado, sea superior a 2 ppm sobre el peso de cemento en seco, ya que a este metal se lo considera sustancia carcinogénica, mutagénica y sensibilizante.

El cemento contiene cantidades de cromo variables no solo procedentes de las materias primas empleadas sino también del desgaste de los refractarios del horno, normalmente de cromo/magnesita, y de la abrasión que sufren las barras de acero que se emplean para la trituración del clínquer, procedente de algunas incorporaciones de residuos, como escorias de alto horno, y del yeso que se adiciona para formular el cemento. Por lo general todo el cromo aportado es trivalente, lo que sucede es que durante la cocción, a elevada temperatura y en presencia de aire, se oxida a Cr (VI).

Es obvio que el empleo de cenizas del tratamiento térmico de los sedimentos solo contribuirá a aumentar el problema del cromo. Por otra parte, el medio acuoso en que se obtienen los prefabricados contribuye a la lixiviación de las sales solubles presentes.

Finalmente la presencia de materia orgánica, aunque sea en pequeñas cantidades pero con un tamaño de partícula muy pequeño, puede contribuir a crear complicaciones en el fraguado.

12.3.3. Encapsulación en mezclas bituminosas

Se trata de realizar mezclas de betumen con diferentes cantidades de lodos. El residuo queda encapsulado cuando la mezcla se enfría. El primer problema sobreviene cuando hay que calentar la mezcla (alrededor de 200 ℃) ya que muchos componentes del lodo van a volatilizar. Las principales ventajas de la tecnología son:

- Insolubilidad en agua.
- Baja difusión de agua.
- Poco atacable por los agentes químicos.
- Costo relativamente bajo.

Sin embargo al tratarse de una materia de naturaleza orgánica, adolece de los problemas propios de ésta:

- Combustibilidad.
- Facilidad de reacción a la acción de agentes oxidantes.

El balance general de estas mezclas, en comparación con las mezclas con cemento y/o cal, es que la resistencia a la lixiviación es excelente.

12.3.4. Valorización en cementera

Las reacciones que tienen lugar en el interior de un horno de clínquer son de naturaleza cerámica. En términos muy elementales se podría definir una cerámica como aquel material que se forma gracias a

una serie de reacciones que desencadenan las fases amorfas, líquidas a alta temperatura, y unas pocas que tienen lugar en estado sólido. En un vidrio, la casi totalidad de las reacciones tienen lugar a partir de fases amorfas pero en el clínquer la totalidad de las reacciones se desarrollan en estado sólido y a partir de materiales cristalinos.

Las reacciones en estado sólido presentan una cinética muy lenta y ello ha de compensarse con un aumento de la temperatura. Así mientras una cerámica convencional se consigue a temperatura próxima a los 1.000 ℃, un horno de clínquer sobrepasa los 1.300 ℃.

Las materias primas usadas para la fabricación del clínquer para el cemento Portland son la caliza, la arcilla y ligeras cantidades de correctores de formulación. Las materias primas se trituran finamente y se introducen en el horno de calcinación. A las temperaturas de trabajo, la caliza (CO_3Ca) se descompone. El óxido de cal resultante es bastante refractario, no reacciona, pero si puede ser fácilmente atacado por los productos resultantes de la descomposición de la arcilla. Así el SiO_2, procedente de la descomposición de los silicatos de los diversos minerales de arcilla, es activo y se combina con el CaO. A la vez los restos de la descomposición de la arcilla van formando diversos compuestos, cristalinos, con el CaO presente. El material sintetizado se denomina clínquer y mineralógicamente está constituido por silicatos y aluminatos de fórmulas complejas.

Al clínquer así obtenido se le añade una cantidad de yeso (puede ser yeso FGD residual), y con frecuencia cenizas volantes de centrales termoeléctricas (otro residuo), y al material fabricado se le denomina cemento portland. De manera similar se fabrica el cemento aluminoso.

La fracción principal de los lodos, las lutitas presentes en los sedimentos, contienen minerales compatibles con las materias primas usadas en la fabricación del clínquer. Por tanto es de suponer que una parte importante, en particular los estratos que no contengan especial contaminación, podrían emplearse para este fin.

12.3.4.1. Conclusiones al empleo de cenizas como materia prima para el clínquer

Es obvio que existen ciertas limitaciones en el empleo que vienen supeditadas a que ciertos contaminantes no afecten a la calidad del clínquer ni a las instalaciones. Entre ellas cabe mencionar los siguientes casos:

- Magnesio, que puede provocar el hinchamiento de la magnesia del cemento en obra (límite: 2% sobre el peso de clínquer).
- Azufre, una parte se incorpora al clínquer pero la otra puede provocar la formación de costras en el propio horno (límite: 3,5% sobre el peso de clínquer).
- Cromo, por la normativa vigente.
- Fósforo, su presencia puede provocar el debilitamiento de la resistencia inicial del cemento en obra (límite: 0,5 de P_2O_5 sobre el peso de clínquer).
- Cloro, los cloruros generados forman anillos que pueden provocar el taponamiento del horno (el limite se establece en 200 mg/kg de clínquer).

Al margen de las limitaciones expuestas, hay que ser conscientes de otros dos parámetros fundamentales:

- Los sedimentos, una vez secos, o las cenizas no aportan ningún valor energético.
- La mayor parte de los metales pesados presentes en las cenizas resultantes de los sedimentos serán emitidas a la atmósfera por la chimenea. Si bien las cantidades son pequeñas y la dilución en la enorme cantidad de gases supone que se cumplan los límites de emisión, desde el punto de vista ambiental los metales serán emitidos a la atmósfera.

12.3.5. Valorización cerámica

La cerámica es una tecnología al alcance de cualquier industria que, debidamente conducida, es apta para el reciclaje de innumerables residuos.

La arcilla está formada por un conjunto de minerales heterogéneos entre los que destacan los minerales de arcilla propiamente dichos pero también hay gran cantidad de otros minerales que nada tienen que ver con la arcilla. Es posible que muchas de las especies minerales presentes en los sedimentos sean compatibles con la gran mayoría de las arcillas.

Cuando se somete una arcilla al calor éste provoca una creciente excitación de las estructuras cristalinas que se van transformando. La cocción es la última etapa del proceso cerámico y está constituida por una serie de procesos fisicoquimicos que se ini-

cian por reacciones en estado sólido. Los tipos de reacciones más destacadas que tienen lugar durante la cocción de las arcillas de interés cerámico son:

- Reacciones de vitrificación, o formación de abundante fase líquida, que a la salida del horno constituirá una fase amorfa que habrá integrado a los metales pesados presentes o, si el tamaño de grano del residuo es considerable, lo encapsulará.
- Destilación de materiales orgánicos. Esta propiedad se usa para la generación de porosidad a partir de residuos orgánicos.
- Descomposición de los minerales arcillosos. Es la parte fundamental, ya que sin la presencia de los minerales de arcilla no existiría el proceso cerámico. Todos estos minerales, al llegar a cierta temperatura rompen los enlaces del agua de constitución y se convierten en sustancias amorfas que, más adelante, iniciaran la formación de fase líquida.
- Descomposición de minerales no arcillosos, que casi siempre, y en mayor o menor grado, suelen estar presentes en la arcilla.

A medida que aumenta la temperatura comienza la formación de la fase amorfa, como consecuencia del desmoronamiento de las estructuras cristalinas. Esta fase amorfa, que es líquida a elevada temperatura, es muy agresiva y conduce a un incremento de las reacciones. La fase líquida se va introduciendo en los intersticios de las micelas de arcilla y debido a la gran viscosidad, las va atrapando y englobando.

La ceramización, cuando se ha llevado a cabo correctamente, establece la frontera con la encapsulación que es el objetivo de toda una serie de procesos alternativos a la ceramización y, por tanto, del futuro comportamiento de un residuo confinado en el seno de un medio receptor. En pocas palabras: si el residuo entra a formar parte íntima, química, del nuevo compuesto el futuro comportamiento del conjunto será homogéneo y correcto, pero si el residuo es solo retenido físicamente, sin cambio de estructura morfológica y/o química, quedará encapsulado y su futura evolución dependerá más del medio donde se halle que de su propia estabilidad y resistencia. En el primer caso se hablará de ceramización (y verdadera inertización) mientras que en el segundo escenario se deberá hablar de encapsulación.

Todas las reacciones en estado sólido, como las cerámicas, presentan, a pesar de la elevada temperatura, una cinética de reacción extremadamente lenta. El factor capaz de acelerar el proceso es el tamaño de grano: Cuanto más fino sea el grano mayor superficie específica y mayor reaccionabilidad y ello es un parámetro que juega a favor de las cenizas procedentes de los sedimentos. Por el contrario, un grano de tamaño suficientemente grande queda sin reaccionar.

Establecer la frontera donde un sedimento se incorpora en la cerámica o queda encapsulado depende de otros factores, además de la distribución granulométrica, como, por ejemplo la reaccionabilidad de la arcilla y el propio residuo (sedimento). Una frontera prudente correspondería un tamaño de 500 mm (0,5 mm). Por encima de este tamaño el residuo queda encapsulado y por debajo se integra en la matriz cerámica.

12.3.5.1. Conclusiones al empleo de cenizas como materia prima para la cerámica

La cerámica abre una amplia gama de posibilidades para la valorización de los lodos. Sin embargo, como acontece con todas las técnicas aparentemente fáciles de aplicar, es preciso tener un conocimiento cerámico profundo así como de los posibles impactos ambientales que una mala gestión de esta tecnología podría ocasionar. Los más importantes son:

- El tamaño de grano usado en la cerámica. En la fabricación de ladrillos y tejas (cerámica roja o estructural) el estado de trituración de la arcilla es ligero y superficial, la gran mayoría de partículas sobrepasa los 0,5 mm, con lo que las cenizas, en el mejor de los casos quedarían encapsuladas. Esta vía de utilización quedaría descartada y debería explorarse su posible incorporación en las cerámicas de pavimento y revestimiento puesto que trabajan con una distribución granulométrica mucho más fina.
- Los sedimentos suelen contener sales solubles. Este es un verdadero problema, como acontecía con la fabricación del hormigón, ya que tanto la cerámica estructural que trabaja con un 20% de agua para la etapa de extrusión como la de pavimentos y revestimientos que llega a usar el 40% de agua en la fase de molienda por vía húmeda, las sales alterarán los parámetros reológicos de la pasta cerámica.
- Emisiones. El factor clave para la contención de los metales en la matriz cerámica se basa en que la temperatura de formación de líquido

(fase amorfa del mineral de arcilla) sea igual o inferior a la de volatilización de los óxidos metálicos presentes. Ello tiene que ver con la naturaleza de la arcilla empleada. Existen muchas arcillas de interés cerámico que se hallan totalmente contraindicadas.

Las fracciones de estratos de lutitas que no contengan determinados contaminantes, o bien que los contaminantes sean compatibles con el tratamiento cerámico, pueden ser perfectamente tratados por esta tecnología.

12.3.6. Valorización por vitrificación

Desde la óptica ambiental la vitrificación debería considerarse el homónimo de la incineración para el tratamiento de residuos inorgánicos tóxicos y peligrosos, con la desventaja, desde el punto de vista energético de que la incineración suele ser un proceso energéticamente excedentario, mientras que la vitrificación es demandante. No obstante, ello no significa que el coste energético deba ser muy elevado. Este dependerá, básicamente, de la temperatura de fusión.

En la formulación de un vitrificado, en principio, son válidos los siguientes criterios:

- En igualdad de condiciones la estructura cristalina es más resistente que la vítrea. Por tanto el fomento de la desvitrificación (recristalización parcial del vidrio) es aconsejable siempre y cuando el vidrio residual no sea muy débil y lixivie fácilmente.
- El factor complejidad de cationes, que forman parte del grupo de los óxidos modificadores de retículo, favorece la fusión más prematura a la par que forma un vidrio más complejo y resistente. Esta propiedad es claramente favorable a la aplicación de la vitrificación a la inertización de residuos.

Una vez el residuo ha sido confinado en el seno del vidriado, aquél pasa a formar parte de la naturaleza vítrea y debe considerarse como un todo. Así, en rigor debe hablarse de silicatos y considerar su comportamiento ante los ataques químicos procedentes de: agua, ácidos y bases.

En el caso de la vitrificación se debe distinguir entre las siguientes modalidades:

- Vitrificación sin valorización. Es decir una vez realizado el vitrificado, éste se deposita en un vertedero de inertes o en un terraplén.
- Vitrificación con valorización económica. A la salida del horno de vitrificación el material se transforma en una baldosa, teja u otro material de construcción que pueda valorizarse. Esta variante es la que se postula para reducir los costes de tratamiento.

12.3.6.1. Conclusiones al empleo de los lodos en la vitrificación

La vitrificación es, de momento, la única tecnología que permite el tratamiento seguro de las cenizas procedentes del tratamiento térmico de los sedimentos, ya que admite:

- *Materia inorgánica.* La perteneciente al propio lodo, en este grupo se incluyen los metales. En el proceso térmico previo la mayoría de los metales se habrán oxidado y algunos se hallarán en forma de sales.
- *Sales secundarias.* La inmensa mayor parte de las sales pueden clasificarse de elementos secundarios ya que no estaban en el lodo original, y se han formado gracias a la acción de los reactivos añadidos para neutralizar los gases ácidos. La problemática añadida es que muchas de estas sales son solubles.
- *Reactivos en exceso.* Buena parte de los reactivos que se añaden al proceso quedan sin reaccionar. Ello es debido a que la baja cinética de estos compuestos obliga a adicionarlos en exceso. Parte de los reactivos interacciona con los metales para formar sales.
- *Material particulado.* De difícil catalogación ya que si bien una parte procede de la propia estructura inorgánica del lodo, otra es fruto de la abrasión en su recorrido por la instalación térmica.
- *Compuestos orgánicos.* Los hidrocarburos de cadena pesada son compuestos muy estables y si bien en la cámara de postcombustión se destruyen, en la etapa de enfriamiento, en la caldera, el tiempo es suficientemente largo como para dar lugar a la reformación de organoclorados que deberán abatirse con la inyección de carbón activo.

12.3.7. Limitaciones y seguridad de los procesos descritos

A título de conclusión, en este apartado se procede a una síntesis de los dos únicos procesos que, en princi-

pio, son aptos para el tratamiento seguro de las cenizas procedentes del proceso térmico de los sedimentos:

- La ceramización.
- La vitrificación.

Aunque se citan de manera independiente, los productos resultantes de las tecnologías de ceramización, vitrificación, y clínquerización forman parte de la gran familia de materiales que se agrupan bajo la denominación de procesos cerámicos. Por ello en la Figura 7.55, se muestra de manera cualitativa la bondad de cada uno de las diversas tecnologías para un mismo residuo.

La figura confirma que la tecnología cerámica y los vitrificados son las más adecuadas para la inertización. Y tratándose de los sedimentos de Flix, probablemente la vitrificación en matriz fosfática ya que los lodos contienen mucha sales de fósforo.

Todo proceso de valorización en el que intervengan sustancias potencialmente contaminantes, como serían las cenizas resultantes de los procesos térmicos de los sedimentos, hay que analizarlo bajo dos puntos de vista diferentes pero complementarios:

- La contaminación originada por el proceso elegido. Es decir, durante todo el proceso de valorización no se permite que se emitan contaminantes: metales, compuestos orgánicos, olores, etc.
- Los metales presentes deben quedar fijados en la matriz de tal manera que bajo ninguna circunstancia puedan salir al exterior.

Es preciso señalar que las dos primeras, la clínquerización y la ceramización en el caso de los sedimentos secos, admiten también el fango entero, es decir fracción orgánica e inorgánica, mientras que la vitrificación está pensada tan solo para el tratamiento de la fracción inorgánica. La fracción orgánica desaparece en los procesos a alta temperatura, como acontece en todos los indicados, mientras que la inorgánica, en líneas generales se comporta de la siguiente manera:

- En la clínquerización, las reacciones tienen lugar, básicamente en estado sólido, sin intervención significativa de la fase amorfa. Ello equivale a decir que los óxidos metálicos difícilmente quedarán insertados en la matriz del clínquer, si bien algunos óxidos pueden quedar adheridos (adsorbidos) a la matriz.
- En la ceramización, los óxidos pasan a formar parte de la matriz cerámica. Se tratará pues de elegir un mineral de arcilla que cree mayor fase amorfa a una temperatura inferior a la de volatilización de los diversos óxidos procedentes del fango. La Figura 7.55 muestra un valor mínimo (correspondiente al máximo de seguridad) en la ceramización. Ello es válido cuando el contaminante pasa a formar parte del compuesto cristalino formado durante el enfriamiento.
- En la vitrificación todos los óxidos pasan a formar parte del vidrio.

En primera conclusión, de cara a la valorización de la fracción inorgánica de los sedimentos, la tecnología más segura de inertización (entendida como sinónimo de irreversibilidad en lo referente a la inserción de metales) es la vitrificación, seguida de la ceramización y, a mayor distancia, la clínquerización, que en la Figura 7.55 forma parte de la banda alta de la cerámica.

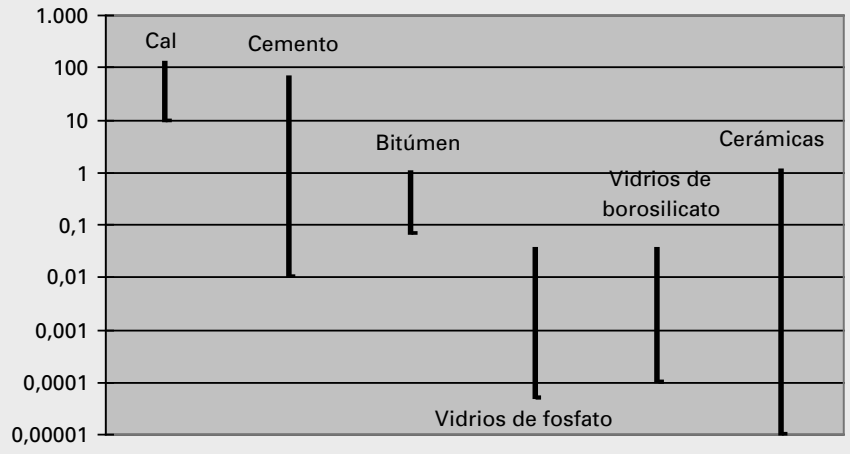


Figura 7.55. Lixiviación, en agua, de un mismo residuo (mg/cm^2 y día). Según tecnología usada.

Si ahora se tiene en cuenta, además de los metales y la fracción mineral inorgánica, el resto de los componentes de la ceniza como las sales solubles y el carbón activo (que alberga buena parte de los metales), el panorama cambia ya que:

- En la clínquerización, la atmósfera oxidante y la elevada temperatura que impera en los alrededores de las partículas sólidas oxidarán las partículas de carbón activo y liberarán los metales que, en su gran mayoría se emitirán a la atmósfera, si bien algunos óxidos pueden quedar adheridos (adsorbidos) a la matriz del clínquer.
- En la ceramización, las sales solubles se diluirán en toda la masa cerámica dando lugar a eflorescencias y alterando la reología y las condiciones de flujo de la masa cerámica que puede dar lugar a una incompatibilidad total.
- En la vitrificación, en hornos de capa fría, gracias a la formación de eutécticos todos los componentes de las cenizas (orgánicas e inorgánicas) quedan incorporadas a la masa de vitrificado.

Así pues, habiendo descartado técnica y ambientalmente todas las opciones de tratamiento de las cenizas menos la de vitrificación en hornos de capa fría, los siguientes apartados se refieren al conjunto de tecnologías que deberían aplicarse al caso del tratamiento de los sedimentos del embalse de Flix.

12.3.8. Estudios de valorización de los sedimentos de La Albufera (Valencia, España)

La Universidad de Valencia y la Universidad Politécnica de Valencia han realizado estudios y pruebas en los que se muestra la posibilidad de emplear los sedimentos provenientes de lodos de dragado de La Albufera. Las opciones estudiadas son:

- Aplicación como enmiendas agrícolas. Debido a la naturaleza eutrófica de la laguna de La Albufera se han ido acumulando importantes cantidades de material orgánico en el fondo y las orillas, lo que le otorga al sedimento un valor como «enmienda» que puede mejorar las propiedades del suelo.
- Fabricación de cemento: El análisis químico y la mineralogía de los sedimentos estudiados muestran una gran uniformidad en su composición, lo que en el caso de ser materiales valorizables para la fabricación de clínquer simplifica la gestión de sedimentos. Pruebas llevadas a cabo en la planta de cemento CEMEX, en Valencia, permite considerar positivamente la aplicación de este material como materia prima debido principalmente al carácter amorfo de algunos minerales presentes en el mismo.
- Industria cerámica: La Comunidad Valenciana (España) es un gran exportador de materiales cerámicos y sus fábricas de cerámica consumen grandes cantidades de materiales arcillosos. Los ensayos realizados con estos sedimentos muestran que se pueden emplear pequeñas cantidades de lodos de dragado en las mezclas cerámicas, limitándose el uso por la elevada presencia de carbonatos en el lodo (solo determinadas pastas cerámicas admiten carbonatos en su composición pero está completamente contraindicado para las destinadas a fabricar materiales gresificados).
- «Construcción blanda»: La gran cantidad de materiales residuales generados y la necesidad de encontrarles un destino apropiado apuntan hacia obras de ingeniería civil como posibilidad de uso. Dentro del mismo parque de La Albufera, parte del material una vez secado se empleó en la construcción de «obras blandas» que no requieren de los materiales propiedades muy refinadas. Ejemplos de uso son la construcción de carriles-bici, subbase de carreteras sin tráfico pesado y suelo cementado.

A título de epílogo, la Tabla 7.54 resume el compendio de posibilidades de valorización a los sedimentos de la Albufera de Valencia.

Otra aplicación, no realizada con los sedimentos de La Albufera, si no con sedimentos contaminados del fondo del mar, es su aplicación para su conversión en un hormigón. El proyecto se empezó en 2005 en Var (Francia). Con este material se fabrica un hormigón que no contiene cemento. Por el momento los bloques de ese hormigón son mantenidos al aire libre en el puerto de Seyne-sur-Mer y en el fondo del mar con la intención de estudiar su resistencia en ambos medios.

Técnicamente, la fabricación de hormigón con sedimento marino, se trata de un proceso de oxidación natural al aire libre del contaminante, así como el uso del ácido fosfórico para inertizar los metales contenidos (básicamente Pb, Cd y Cu).

Tabla 7.54. Posibles aplicaciones y revisión de propiedades (E. Peris Mora 2006)

Alternativas de Re-utilización	Propiedades positivas	Propiedades Negativas	Conclusión
Enmiendas en suelos agrícolas	– Granulometría. – Materia orgánica. – Nutrientes. – Capacidad de retención de agua. – Capacidad de intercambio iónico.	– Contaminación por tóxicos.	– Expectativas favorables. – Posibles aplicaciones en huertos y bosques.
Fabricación de cemento	– Granulometría. – Composición química. – Carácter amorfo parcial. – Contenido en materia orgánica. – Mejora la imagen de la cementera. – Bajo coste.	– Exceso de Cr y otros elementos. – Exceso de cloruros. – Substancias tóxicas volátiles. – Coste de transporte. – Problemas de secado.	– Expectativas favorables. – Posible consumo en grandes cantidades.
Industria cerámica	– Plasticidad. – Propiedades cerámicas. – Composición mineralógica.	– Abundantes carbonatos.	– Expectativas desfavorables. – Por sus bajas prestaciones no se podría emplear en gran cantidad.
Ingeniería civil: construcciones blandas e infraestructura	– Accesibilidad. – Bajo coste.	– Arcillas expansivas. – Excesiva materia orgánica.	– Expectativas favorables para consumos medios.
Restauración de dunas	– Granulometría. – Proximidad de aplicación. – Compatibilidad con obra blanda.	– Exceso de arcillas. – Contaminantes tóxicos. – Exceso de materia orgánica.	– Experimentación pendiente.
Inmovilización in situ	– Carácter no abiótico del fondo del lago.	– Riesgos para algunas especies biológicas.	– El proyecto de dragado en el parque natural deberá ser diseñado para minimizar el impacto ecológico.
Transporte a vertedero	– Contaminación tóxica por encima de límites legales.	– Inaceptabilidad por opinión pública. – Costes elevados.	– En alguna áreas del lago la contaminación resulta muy elevada y exigiría el tratamiento de los lodos como residuo de tratamiento especial.

12.4. EL PROCESO PROPUESTO PARA LA VALORIZACIÓN DE LOS SEDIMENTOS DE FLIX

La Figura 7.56 muestra, de manera esquemática, la serie de tratamientos propuestos para la valorización de los sedimentos del pantano de Flix.

Una vez extraído el sedimento hay que proceder a la deshidratación mecánica donde se elimina la mayor parte del agua que, una vez tratada, se devuelve al embalse.

Seguidamente hay que llevar a cabo un secado térmico para reducir la humedad al valor más próximo a cero. El aire de secado se halla en circuito cerrado y no hay emisiones.

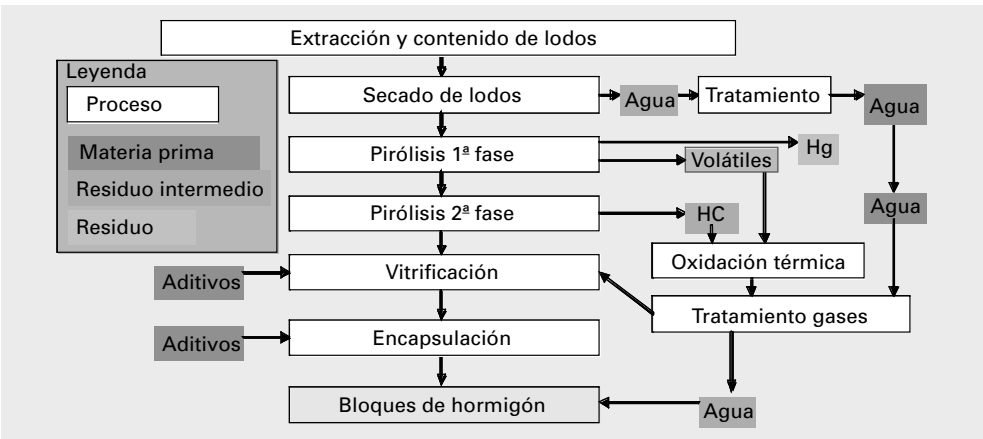


Figura 7.56. Esquema general del proceso propuesto.

El agua condensada en el proceso de secado se usa como refrigerante y para la fabricación de bloques de hormigón antes de depurarla y ser devuelta al embalse.

12.4.1. Pirólisis fraccionada

Habida cuenta de la heterogeneidad de un residuo como el presente con compuestos volátiles (orgánicos e inorgánicos), organoclorados y compuestos radioactivos, se propone un pirólisis fracciona en dos, o más etapas.

La pirólisis es un calentamiento indirecto sin presencia de aire. En esta etapa está previsto que existan, como muestra la Figura 7.57, tres clases de efluentes:

- Mercurio, que se recupera por condensación.
- Compuestos volátiles, que pasan a la fase de oxidación térmica.
- Restos de humedad, que acompañan a los gases.

Las diferentes corrientes gaseosas se envían a la cámara de oxidación.

La segunda etapa de pirólisis ha de ser semejante a la anterior pero a mayor temperatura.

Al final de esta etapa es donde se consigue separar la corriente de inorgánicos de los orgánicos y organoclorados. Los efluentes son:

- Sedimentos inorgánicos con metales pesados y radionúcleos, que pasan a la etapa de vitrificación.
- La materia orgánica y los organoclorados pasan a la etapa de oxidación térmica.

La fracción gaseosa, presumiblemente, estará formada por Hg y algunos hidrocarburos volátiles. Una vez recuperado el mercurio la corriente gaseosa residual debe enviarse a oxidación térmica.

12.4.2. Oxidación térmica y tratamiento de los efluentes

En cada etapa de la pirólisis se desprende una fracción que se trata por sistemas convencionales. Para empezar se añade una cantidad de aire para provocar la oxidación de toda la materia orgánica.

La fracción gaseosa pesada, supuestamente estará formada por hidrocarburos pesados (algunos de ellos producto de la propia pirólisis) y diversos organoclorados.

También se debe añadir una cantidad de amoníaco para abatir los NO_x formados.

Los gases penetran en la cámara de potcombustión donde debido a la alta temperatura (1.200 ℃) y dos segundos de tiempo de retención de los gases se logra una destrucción superior al 99,999% de todos los compuestos orgánicos presentes.

A la salida de la cámara de poscombustión, los gases se enfrían bruscamente con agua para evitar la reformación de organoclorados. De ahí se pasa a una torre de neutralización donde los compuestos ácidos presentes Cl y S, se transforman en sales.

Se inyecta una corriente de carbón activo para adsorber los compuestos organoclorados que hayan podido reformarse así como los metales arrastrados por la corriente de gases. Finalmente un filtro de mangas recoge todos los contaminantes.

12.4.3. Tratamiento de la fracción sólida: vitrificación

Es la fracción más importante en términos cuantitativos y, además la que contiene, también de forma mayoritaria, los isótopos radioactivos. Por tanto, una vez añadidos los aditivos necesarios (es imprescindible conocer la naturaleza exacta del residuo para

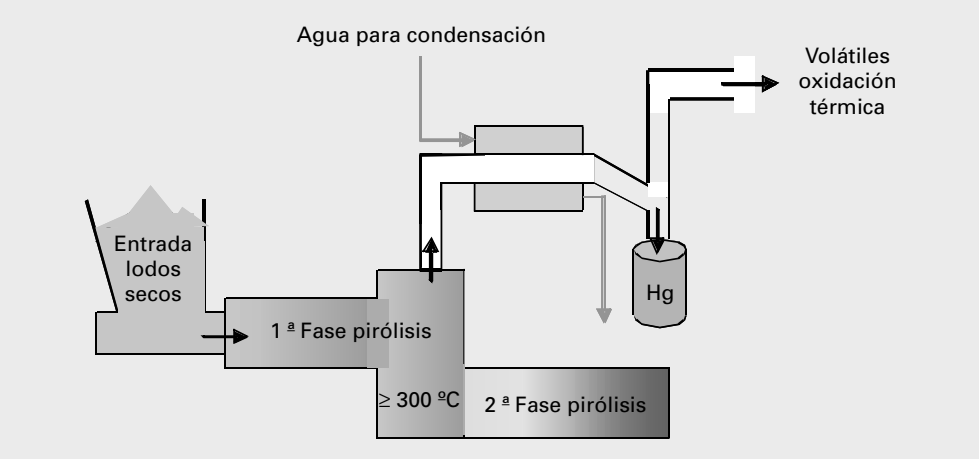


Figura 7.57. Esquema del proceso de pirólisis en cadena.

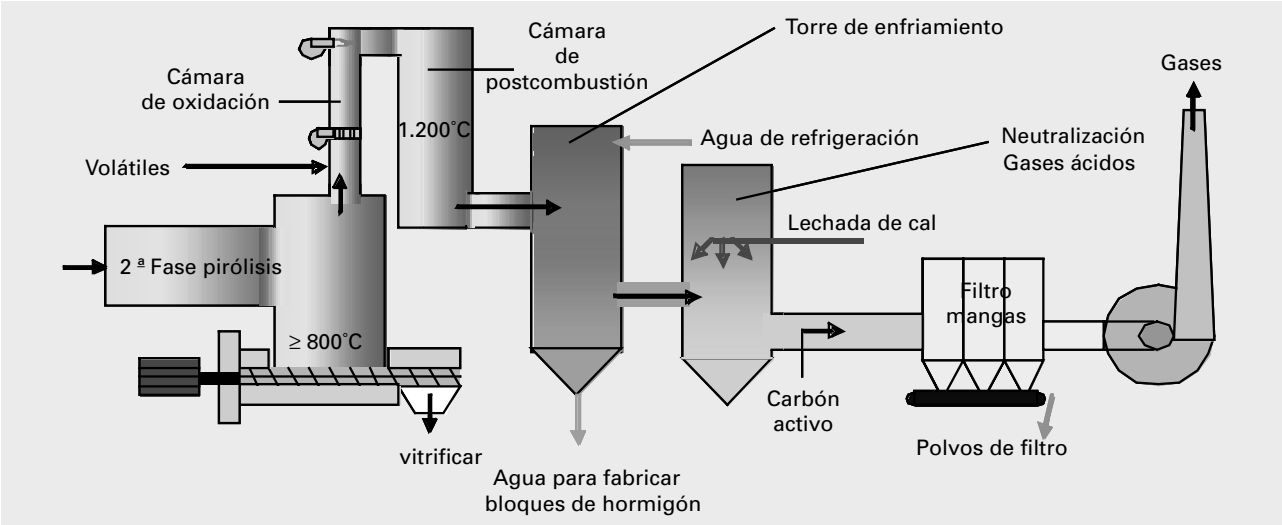


Figura 7.58. Esquema general de la oxidación térmica y del tratamiento de gases.

evaluar la cantidad de aditivos y la temperatura de vitrificación).

La vitrificación se lleva a cabo en un horno eléctrico. El residuo con los aditivos y los polvos de filtro se introducen en el horno de forma que ocupe toda la superficie del baño. Con esta tecnología todo lo que se ingresa, se vitrifica: no hay emisiones.

Se trata de un proceso que, por fusión, forma un silicato complejo (vidrio) de donde los elementos (óxidos metálicos y sales) no pueden escapar.

La naturaleza de los sedimentos (de acuerdo con la caracterización del CSIC+AUB) indica que por si solos no van a vitrificar, por ello se le añade aditivos.

Este proceso de vitrificación es eléctrico y, al trabajar por el sistema de capa fría («*cold top*»), permite la inserción de otros componentes, como los polvos de filtro. La novedad de este sistema es que «todo lo que entra» sale vitrificado y no hay residuos secundarios. De manera que se trata de un proceso de RESIDUO CERO.

12.5. DESTINO DEL VITRIFICADO

El material vitrificado es absolutamente inerte, por tanto se puede almacenar a granel (el material vitrificado tiene el tamaño de un grano de arroz, cuando se vierte sobre agua) o usarlo como grava para hacer bloques de hormigón, para dejarlos *in situ* (en el vertedero), que sirvan de muros de contención para la extracción de los lodos confinados en el embalse, para paramentos de autovías o para construir muelles.

Una vez vitrificado el material fabricado a partir de residuos permite presentarse en diferentes formas. El parámetro que más influye en esta decisión es de carácter eminentemente económico. Las formas físicas básicas son las siguientes:

- A granel, en forma de grava. Es la forma que adopta el vidrio al caer directamente en agua fría (frita). Se puede usar directamente a granel o en la formulación de hormigón en sustitución del árido natural.
- Baldosa. El vidrio se deja caer en un molde de acero refrigerado; la pieza extraída se introduce en un arca para eliminar tensiones térmicas.
- Material fibroso. El vidrio al caer en el horno se centrifuga en un crisol de platino. La gota de vidrio se enfría y se estira hasta adquirir la forma adecuada.

En función de la cantidad de radioisótopos presentes, este autor propone la fabricación de «grava» vitrificada para usarla en bloques de hormigón de poco espesor, es decir con mucha superficie lateral en relación a su volumen. De esta manera se facilita la disipación del calor engendrado por la emisión de partículas a.

12.6. IMPLICACIONES ECONÓMICAS Y AMBIENTALES

Para llevar a cabo una reflexión sobre los costes de explotación y su comportamiento futuro hay que te-

ner en cuenta la evolución de dos parámetros fundamentales:

- La evolución del precio de la electricidad, puesto que los sistemas analizados, excepto el vitrificador abierto con gas natural (descartado por problemas ambientales), funcionan con electricidad.
- La evolución de los costes de vertido, para tener en cuenta y valorar las soluciones alternativas de los tratamientos alternativos a la vitrificación de cenizas.
- Si no se valoriza, el despilfarro de materias primas, es total. Se prevé que su precio vaya en aumento.

El punto más sobresaliente de la tecnología descrita es que permite la valorización del material vitrificado, es decir no hay que usar el vertedero.

Dentro de los diversos tipos de vitrificación, es recomendable usar la variante de horno eléctrico de capa fría ya que es la única que no deja residuos secundarios. En conclusión:

- Desde el punto de vista ambiental el sistema de vitrificación eléctrico en capa fría es la única variante donde no hay que instalar ningún tipo de línea de tratamiento de gases. En consecuencia se trata del sistema más respetuoso con el medio ambiente.
- En el caso de que los sedimentos contengan isótopos radioactivos, como es el caso de Flix, la vitrificación permite la fabricación de «grava» vitrificada para la confección de bloques de hormigón lo que permitiría la necesaria disipación de calor.
- Siempre que sea posible una vitrificación, o un sistema que permita la valorización del material residual (sedimento) los costes de explotación se reducen de manera importante, aun que, en primera instancia la inversión sea más elevada.

Bibliografía

ADEME. Caractérisation des matériaux considérés comme inertes. *Rapport Final*. 1993.

AIAS. *Galvanotecnia i medi ambient. Guía pràctica per a una correcta gestió ambiental*. Ed. Departament de Medi Ambient. Generalitat de Catalunya. Barcelona.

AINETO, M. *et al.* La escoria de la central térmica GICC ELCOGAS como materia prima para la síntesis de materiales vitrocerámicos. *Bol. Soc. Esp. Ceram*. V. 45 (2006).

AIMME. IMPIVA: *Tecnologías de vertido cero en la industria de tratamiento de superfícies*. Generalitat Valenciana. 1998.

ALIPRANDI, G. *Matériauz réfractaires et céramiques techniques*. Editions Septima. París. 1979.

ÁLVAREZ. C. JORDÁN, M. M. BOIX, A. SANFELIU, T. Estudio de partículas esféricas de naturaleza no cristalina como posibles trazadores de emisiones procedentes de la industria cerámica. *TecnoAmbiente 89* (1998).

ANDREOLA, F. *et al.* Cathode ray tube glass recycling: an example of clean technology. *Waste Management & Research* (2005).

BAUMGÄTEL , G. Disposal categories and utilisation of slag and fly ash obtained in the PRENFLO process. En: I*AE Expert meeting on the use of coal gasification slag*. Arnhem, Países Bajos. 1990.

BOLT, N. *et al.* ICGCC: Slag utilisation, hot gas clean-up and waste water treatment research En: *Coal and power technology '90*. Amsterdam, Países Bajos. 1990.

CÁCERES *et al.* Caracterización de fibras en forma de lana de roca para aislamiento obtenidas a partir de basaltos canarios. *Materiales de Construcción*, 1996. Vol. 446, n.º 242.

CARRERAS, L. MONTALÁ, F. Los recubrimientos de capas finas duras. *Revista Ibérica*. Junio 2003.

DE LABARRE, C. Vitrification des résidus d'incineration. *Verre*. 1997. Vol. 3.

DE LA FUENTE, C. et al. Yacimientos basálticos de Lanzarote y de Hierro. Posibles aplicaciones en la industria vitrocerámica y petrúrgica. *Ciencia y Tecnología de las Materiales Cerámicos*. España (1989).

ELIAS, X. *Master en Tecnología y Ciencia Cerámica*. Fundación Universitaria Iberoamericana: FUNIBER (*w.w.w.funiber.org)*.

ELIAS, X. Secado térmico de fangos de EDAR y su disposición. *Revista Tecnología del Agua*. Julio 2002. Núm. 226.

ELIAS, X. La vitrificación, una alternativa a la valorización de los RAEE. *Revista SAM*. Junio 2006. Núm. 14. Diputación de Barcelona.

ELIAS, X. Tecnologías de tratamiento y valorización de sedimentos contaminados: Tratamientos térmicos y de encapsulación. *Congreso II Jornadas Intersed*. Santander (Octubre 2006).

ELIAS, X. *La fabricación de materiales cerámicos*. (En imprenta).

ELIAS, X. Saint Gobain: *Jornadas de Medio Ambiente* Sitges. España (1999).

FABGRI, B.: Flúor en las arcillas: contenidos y mecanismos de emisión. *Cerámica Información* (1992).

FERNÁNDEZ, J. M. *El vidrio. Constitución, fabricación y propiedades*. CSIC. Madrid (1985).

FORO NUCLEAR. Energía 2005. www.foronuclear.org.

GARCÍA LOZANO, E. *Residuos tóxicos y peligrosos. Tratamiento y eliminación*. Ed. MOPTMA. Madrid, 1989.

GIL-NEGRETE y otros: *Tecnologías asistidas por plasma. Fundamentos, aplicaciones industriales y tecnológicas*. Ed. McGraw-Hill. Madrid (1997).

GOUMANS, J. J. J. M. *et al. Waste materials in construction*. Elsevier. Amsterdam.

IHOBE, S. A. *Libro blanco para la minimización de residuos y emisiones. Recubrimientos electrolíticos*. Gobierno Vasco, Marzo 1997.

INJUK, J. VAN DER GRIEKEN, R.: Atmospheric concentrations and deposition of heavy metals over the North Sea: A literature review. *Journal of atmospheric chemistry.* 1995. 20.

JOUAN, A. *et al.* La vitrification des déchets radioactifs de haute activité en France. *Verre*. 1997. Vol. 3.

KARAMANOV, A. *et al.* Synthesis of wall-covering glass-ceramics from waste materials. *Glastec. Ber. Glass SCI. Techol*. 1994. 67C.

KARAMANOV, A. *et al.* Synthesis of wall-covering glass-ceramics from waste materials. *Glastec. Ber. Glass SCI. Techol.* 1994. 67C.

KINGERY, W. D. *et al. Introduction to ceramics*. John Wiley & Sons. New York, 1960.

KRAUS, F., MEUNIER, R. Propriétés d'un vitrificat de Refiom produit par un procédé arc électrique. *Verre*. 1997. Vol. 3.

KRAUSS, M. *et al.* Characterization of filter dust in the glass container industry and definition on its influence on green glass melts. *Glastec. Ber. Glass SCI. Techol*. 1995. 68.

KRAUSS, M. *et al.* Characterization of filter dust in the glass container industry and definition on its influence on green glass melts. *Glastec. Ber. Glass SCI. Techol*. 1995. 68.

LAROCHE, G. *Les plasmas dans l'industrie. Electricité de France*. Ed. Lavoissier, París. 1991.

LASCO, A. *et al. Tratamiento de emisiones gaseosas, efluentes líquidos y residuos sólidos en la industria cerámica*. Castellón AICE-ITC (1992).

MELLO-CASTANHO, S. *et al.* Vidrios de silicatos partir de residuos galvánicos con alto contenido en *Cr y Ni. Bol. Soc. Esp. Ceram*. 2005. Vol. 45.

OJOVAN, M. I. *An introduction to nuclear waste immobilitation*. Amsterdam. Ed. Elsevier (2005).

PARMELEE, C. *Ceramic glazes*. Cahners Books. USA. 1973.

PERIS, E. *et al.* Caracterizacvión de la contaminación persistente en los ssedimientos que aterran la laguna en el Parque Nacional de La Albufera, y propuesta de alternativas de su valoración. *II Jornadas INTERSED*. Libro resúmenes. Universidad de Cantabria (2006).

RABIGER, W. *et al.* Experience in operation of a pilot plant melting residual substances. Glastec. Ber. Glass SCI. Techol., 68. 1995.

RINCÓN , J. M. *et al.* Los materiales vitrocerámicos en la construcción. *Materiales de Construcción*. 1996. Vol. 46, n.º 242.

ROLLIN, M. Production d'un matériau valorisable à partir de déchets d'amiante. *Verre*. 1997. Vol. 3.

SLOOT VAN DER, H. *et al.* Leaching characteristics of construction materials and stabilization products containing waste materials. En: Environamental aspects of stabilization and solidification of hazardous and radioactive waste. *ASTM STP* 1033 Philadelphia, USA. 1989.

STEVENSON, J. P. Borates in glazes and recent developments in the industry. *Borax Research Report* (1991).

US EPA: «NO_x emissions from glass manufacturing. *EPA-453/R-94-037*, Juny (1994).

VIETEZ, J. *et al.* Recuperación del Mo, Co, Ni y V de residuos de catalizadores de hidrosulfonación. Parte I: Caracterización y test de lixiviación. *Rev. Medio Ambiente*. 1990.

W. R. CHINIS *et al. Plasma hearth melting of seeded titanium*. 1988 Vacuum Metallurgy Conference. San Diego CA (USA).

Valoración de residuos procedentes de grandes industrias

8

Xavier Elias

ÍNDICE

1. Valorización de residuos procedentes de la industria minera energética 535
1.1. La minería española 536
1.2. La industria minera del carbón en España ... 538
1.3. Generación de estériles en la minería 539
1.4. El impacto ambiental de los combustibles fósiles 548
2. El sector de la generación de electricidad 549
2.1. La sostenibilidad de la generación de electricidad 549
2.2. Valorización de residuos procedentes de las centrales termoeléctricas 554
3. Valorización de los residuos procedentes de la industria siderúrgica y metalúrgica 558
3.1. Naturaleza de los residuos de la siderurgia integral 559
3.2. Generación y propiedades de las escorias de alto horno 560
3.3. Reciclado por fusión de escorias de hornos eléctricos 568
3.4. Residuos en la fabricación del acero inoxidable 569
3.5. Recuperación de Zn y Pb. El proceso Waelz. 569
3.6. Valoración de los residuos de la industria del aluminio 570
4. La agricultura como gran industria y su impacto en el medio ambiente 571
4.1. Afectación al suelo 574
4.2. Industria de transformados vegetales 574
4.3. Industria cárnica 579
4.4. Industria vinícola 584
4.5. Industria oleícola 585
4.6. La industria azucarera 585
4.7. Industria de producción de agroquímicos 588
5. Impacto ambiental en la industria de la piel ... 588
5.1. Procesos industriales para el curtido de la piel 590
5.2. Proceso de ribera 590
5.3. Cueros y pieles 591
5.4. Residuos de la industria del cuero 594
6. La industria textil 596
6.1. Descripción de la materia prima, procesos y productos 597
6.2. Principales procesos en seco o con poca agua 597
6.3. Otros procesos de fabricación de tejidos 598
6.4. Impacto ambiental de la industria textil 600
6.5. Principales procesos en la industria textil 603
7. El impacto de las plantas de tratamientos de residuos 605
7.1. Impacto de los vertederos 605
7.2. Plantas de compostaje 608
7.3. Estaciones depuradoras de aguas residuales. 609
7.4. Plantas de tratamiento de purines 611
7.5. Plantas incineradoras de RSU 612
8. La industria química 614
8.1. La industria petroquímica 615
8.2. Posibilidades de valorización de material filtrante y catalizadores agotados 617
8.3. La industria química básica y transformadora 619
8.4. Valorización de residuos en la industria química inorgánica 620
8.5 Impacto ambiental de la industria de procesos químicos orgánicos 622
8.6. Recuperación de tricloroetileno y etanol ... 625
8.7. Subproductos en la fabricación de materiales plásticos 626

8.8. La problemática de la fabricación de productos fitosanitarios 626
8.9. Residuos en la fabricación de pinturas, barnices y lacas 627
8.10. Aprovechamiento de remanentes en la producción de lana celulósica 628
8.11. Tratamiento y sustitución de los CFC's 628
8.12. Química y desarrollo sostenible..... 630
9. **Valorización de escombros de firmes de carretera y construcción** 631
9.1. Aplicación de los neumáticos usados a la fabricación de asfaltos para firmes de carreteras..... 632
9.2. Residuos de construcción y demolición de hormigón para firmes de rodadura..... 633
Bibliografía..... 634

RESUMEN

Este capítulo está destinado a la revisión de la tipología de residuos que generan las grandes industrias así como a sus posibilidades reales de reciclaje. A diferencia de otros partes de la obra donde se describe el residuo, en este apartado se incide en la naturaleza de la industria que lo genera.

La revisión comienza por la industria minera, en particular la del carbón. Se trata de una actividad que lleva siglos en marcha y ello ha supuesto un progresivo empobrecimiento de los principales yacimientos con la inmediata consecuencia: el incremento de residuos.

En segundo lugar se procede a una sucinta revisión de las posibilidades de valorización de los residuos generados por las industrias agroalimentaria, siderúrgica y metalúrgica.

Las centrales termoeléctricas también son grandes generadoras de residuos, en particular de cenizas volantes. A éstas se dedican nuevas vías de reciclaje al margen de las aplicaciones tradicionales en hormigones.

Para finalizar el capítulo se aborda, aunque de manera superficial, la problemática de reciclaje de residuos en la industria química y petroquímica.

1. Valoración de residuos procedentes de la industria minera energética

La problemática ambiental de la industria minera metálica se desarrolla en un Capítulo 9 de esta obra. En este apartado se hace una referencia a la problemática de la minería extractiva para materiales de construcción y, en especial a la minería energética.

La minería es, después de la agricultura, la actividad más antigua llevada a cabo por el hombre y de su evolución da fe el distinto nombre de la historia de la humanidad: Edad de Piedra, del Bronce, del Hierro, del «Petróleo» etc. Sin embargo, el conflicto entre la minería y el medio ambiente también viene de antiguo como perfectamente expone un texto de Minería del Mundo de Georgius Agrícola, 1556, en el que describe los efectos de la actividad en Alemania, con «la destrucción de bosques y campos para extraer la madera para la entibación, maquinaria y combustible, envenenando ríos y arroyos, derruyendo animales y peces...».

La industria minera y sus actividades, representa uno de los sectores industriales con mayor capacidad de generación de residuos. En España su aportación relativa está evaluada en un 30% del total de residuos generados. Sin embargo en otros países de tradición minera la cifra puede superar, con facilidad, el 50% que además cuenta con el factor agravante de que muchos estériles se hallan fuertemente contaminados por los productos químicos usados en el tratamiento *in situ* de los materiales explotados.

Desde el punto de vista ambiental, la problemática minera es importante en el siguiente orden:

- Minería metálica.
- Minería energética: carbón, petróleo y gas natural.
- Minería extractiva para materiales de construcción, incluyendo los áridos que no sufren casi ninguna transformación posterior.

Desde 2005 y por encargo de la Comisión Europea se está realizando un estudio de gestión de los residuos de minas y canteras de la UE con el objetivo que todo ello desemboque en una directiva. Los ejes centrales de este manejo de residuos se pueden resumir en:

- La necesidad de obtener licencia de actividad, para lo cual es necesario presentar garantía financieras de que se realizarán las labores de recuperación de los emplazamientos mineros cuya explotación haya concluido.
- La contratación de un seguro de responsabilidad civil.
- La obligación de prever y desarrollar medidas de prevención de grandes accidentes.
- La elaboración de un plan de gestión de residuos.

Por su parte, durante este periodo se conmina a los estados miembros a que elaboren un inventario de los emplazamientos abandonados con sus características principales.

Los residuos procedentes de las labores de concentración, en el caso de la minería metálica se almacenan en las llamadas balsas de residuos, que entrañan un potencial peligro y, con frecuencia da lugar a desastres ecológicos como el acontecido en Aznarcóllar (Sevilla, España) en 1998 o el de Baia Mare (Rumania). Por ello el Parlamento Europeo ha dado el visto bueno a una directiva que fija los mínimos requisitos en materia de gestión de balsas y escombreras de residuos mineros. En ella se debe especificar los planes de explotación, sellado y postclausura de la actividad, así como prever unas garantías financieras para preservar las posibles zonas afectadas, como contaminación del suelo, aguas superficiales y subterráneas.

El Parlamento Europeo calcula en más de 400 millones de toneladas la cantidad de residuos mineros que genera anualmente la UE de los 15.

Desde el punto de vista de los impactos ambientales, la actividad minera se puede dividir en:

- *Minería subterránea:* donde los impactos menores son: eliminación y tratamiento de las aguas residuales, ruido, polvo, impacto visual, inutilización temporal del suelo y modificación del régimen y la calidad de las aguas subterráneas. Los impactos mayores: Subsidiencia. Escombreras y balsas de residuos. Con todo parece que, hoy en día se apuesta por la minería subterránea.
- *Minería a cielo abierto:* donde los principales impactos son: La intrusión visual, desmonte de recubrimiento y estéril. Polvo, ruidos, vibraciones. Erosión. Riesgo de deslizamientos. Modificación del régimen y calidad de las aguas superficiales y subterráneas. Escombreras y balsas de residuos.

Una de las actividades más potenciadas es la restauración del área afectada para intentar integrarla de nuevo al medio. En EE UU desde los años 1930 a 1980 se ha experimentado, con notable éxito, la revegetación de balsas de estériles de flotación de diferentes minerales (Pb, Zn, Cu, Fe, etc.).

1.1. LA MINERÍA ESPAÑOLA

En la década de los 2000 la actividad minera en España se incrementó en general, si bien algunas actividades sufrieron un ligero retroceso.

1.1.1. Minerales energéticos

De acuerdo con el balance de actividades de Carbunión de 2003, la cantidad de carbón nacional producido en 2003 fue un 1,6% inferior al año anterior, cuando de hecho el compromiso que la asociación había tomado con el Gobierno, para el cumplimiento del Plan de Minería del Carbón, estaba fijado en una reducción del 4%. Sin embargo, la producción de lignitos ha ido en aumento.

La extracción de crudo se ha reducido, a partir de 2003, a plataformas «*offshore*» y se encuentran en fase de agotamiento de las reservas, lo mismo acontece con los pequeños campos de producción de gas natural. La Tabla 8.1, según fuentes de Carbunión, muestra la relación de minerales energéticos en España.

Tabla 8.1. Producción de minerales energéticos en España

	Unidad	2001	2002	2003
Antracita y hulla	Kt	10.492	9.751	9.580
Lignito negro	Kt	3.456	3.558	3.520
Lignito pardo	Kt	8.787	8.726	8.100
Petróleo	kt	388	324	234
Gas natural	hm^3	556	551	600
Uranio	t (U_3O_8)	42	54	

1.1.2. Minerales metálicos

Después del cierre de las explotaciones de Reocín (Zn y Pb), en el norte de España, la minería metálica española se encuentra bajo mínimos de índole históricos. Esta mina, tras 140 años de actividad, en el primer trimestre de 2003, arrancó sus últimas 199.376 toneladas que produjeron 1.785 t de plomo metal y 36.454 de zinc metal.

La Tabla 8.2 muestra el panorama de la minería metálica española según el Ministerio de Economía.

Tabla 8.2. Producción de minerales metálicos en España

	Unidad	2001	2002	2003
Cobre	kt	9,8	1,2	0,6
Zinc	kt	165,6	69,9	36,5
Plomo	kt	35,6	6,2	1,8
Plata	kt	52	3	2,3
Mercurio	kt	524	726	745
Estaño	kt	0,5	0,3	—
Oro	kg	5.922	5.512	5.417

Desde el punto de vista ambiental, no deja de ser sorprendente que el único metal que haya aumentado la producción, y además de manera significativa, haya sido el mercurio, metal pesado que ocupa el primer lugar en el ranquing de los metales peligrosos.

En la actualidad se está reabriendo en Riotinto (Sur de España) una mina para la producción de cátodos de cobre (99,99% de pureza), se espera que genere 66.000 t/año de Cu a partir de piritas, calcosina y covellina. En promedio se estima una riqueza del 6,9% en Cu, valor considerado muy bueno. No obstante, ello significa que, como mínimo va a generar el 93,1% de residuos, que sobre el valor total de 860.000 t/año, significa 800.660 t/año de residuos, con al menos un 20% de catalogación de peligrosos. En cifras redondas todo ello supone una producción de 100 kg/año y andaluz. Al margen de esta particularidad, el principal impacto ambiental es la necesidad de agua de proceso. Está previsto minimizarla y reinyectarla al freático una vez empleada.

También en la provincia de Badajoz se pondrá en marcha una explotación para la obtención de Ni-Cu y platínidos. En concreto los minerales son pirrotita, pentlandita y calcopirita. Las riquezas estimadas son de 15,7 Mt con 0,66% de Ni, 0,46 de Cu y 0,47 g/t de platinoides.

España es un país con fuertes pasivos ambientales consecuencia de haber sido, desde tiempos remotos, un país minero. Por ejemplo, tiene más de 100 balsas de residuos e incontables zonas para recuperar. Sin embargo, los nuevos proyectos citados se diseñan bajo unos parámetros técnicos avanzados y con respeto al medio ambiente.

Científicos y técnicos del MIT (*Massachussets Institute of Technology*) han demostrado la viabilidad técnica de la obtención de hierro a través de la electrólisis del óxido licuado MOE, en sus siglas en inglés. Desde el punto de vista ecológico no aumenta la cantidad de CO_2 puesto que no necesita C, y además genera oxígeno.

La finalidad del proyecto, financiado por el *American Iron and Steel Institute (AISI)*, es la de aumentar la competitividad de la industria del acero estadounidense al tiempo que se protege el medioambiente y se ahorra energía. El proceso consiste en hacer pasar una corriente eléctrica en el seno de una disolución de óxido de hierro, donde se obtiene hierro líquido y gas oxígeno. Esta variante de la electrólisis trabaja a 1.600 ℃.

1.1.3. Minerales no metálicos

La minería no metálica es, en España, la más importante entre todas. Desde el punto de vista técnico conviene llevar a cabo una subclasificación:

- Minería no metálica para elaborar otras materias primas.
- Rocas ornamentales.
- Rocas y minerales para la construcción.

La primera clasificación, desde el punto de vista ambiental es la que debe prestarse una mayor atención ya que el mineral ha de sufrir importantes transformaciones, en cierto sentido similar a lo acontecido con la minería metálica, y ello supone un potencial impacto ambiental. La Tabla 8.3, cuya fuente es el Ministerio de Economía, muestra la evolución de la producción en términos del mineral ya sintetizado, por tanto, poco se indica de la generación de residuos asociada.

Tabla 8.3. Producción de minerales no metálicos en España

Mineral		Unidad	2001	2002	2003
Fluorita	CaF_2	kt	129	128	132
Sales potásicas	K_2O	kt	471	407	506
Sal gema	Na_2O	kt	3.655	4.070	3.790
Cuarzo	SiO_2	kt	2.000	2.000	2.000
Arcillas especiales		kt	965	866	900
Magnesita cruda	MgO	kt	233	265	255
Barita	$BaSO_4$	kt	51	52	37
Talco		kt	93	108	—
Magnetita			55	25	—
Lepidolita		kt	7	7	8
Diatomita		kt	66	50	55
Sulfato sódico	Na_2SO_4	kt	855	939	930
Celestina	$SrSO_4$	kt	129	160	144
Caolín lavado		kt	440	450	460
Feldespato K		kt	514	550	570
Calcita/Aragonito	$CaCO_3$	kt	2.000	2.100	2.000
Óxidos de hierro		kt	126	144	150
Turba		kt	46	52	50

De la Tabla 8.3 es preciso hacer algunas anotaciones. En algunos minerales no se pone la fórmula puesto que mineralógicamente no existe. Así existen centenares de minerales de arcilla o infinitas fórmulas de los feldespatos. Si sorprende que se incluya el sulfato sódico ya que es una sal soluble que se fabrica artificialmente y, desde el punto de vista ambiental que se permita la extracción de la turba cuando esta actividad está seriamente restringida en la UE.

Por lo general las huellas de las explotaciones agotadas y abandonadas son muy importantes. Sin embargo hay ocasiones en que ello, lejos de ser un problema puede representar una ventaja. Así por ejemplo, en el caso de las minas de sal de Collbató (Barcelona), Zipaquirá (Colombia) y Wieliczka (Polonia) se han destinado a reclamo turístico (las dos últimas son auténticas catedrales de sal consagradas por los respectivos obispos), mientras que las de Gorleben (Alemania) se están usando como lugar seguro para el confinamiento de residuos peligroso, en particular radioactivos. Las minas de sal presentan una gran estabilidad geológica y por su composición, no albergan organismos vivos ni humedad.

La producción de rocas ornamentales ascendió en 2003 a 7.837.272 t, con un 2,9% de aumento con respecto al año anterior. La región de Andalucía Oriental y la Comunidad Valenciana acaparan casi el 75% de la producción. La Tabla 8.4, cuya fuente es el Ministerio de Economía, muestra la evolución de la producción en términos de extracción del mineral. Debido al relativo poco valor económico asociado, la generación de residuos no es muy significativa, se reduce a los estériles de cantera que solo pueden producir impacto visual y los lodos procedentes del corte y pulido.

Finalmente las cantidades más importantes se originan en la producción de rocas para la construc-

Tabla 8.4. Producción de rocas ornamentales en España

	Unidad	2001	2002	2003
Granito ornamental	kt	2.510	1.260	1.237
Mármol y calizas	kt	5.313	5.225	5.403
Pizarra elaborada	kt	846	845	837
Piedra de Cantería	kt	101	108	212

ción, por orden de importancia calizas (fabricación de cemento), arenas y gravas (hormigón), arcillas (cerámica y cemento) y diversos minerales para la industria metalúrgica y del vidrio. La Tabla 8.5, cuya fuente es el Ministerio de Economía, muestra la evolución de la producción en términos de extracción del mineral. También en este caso, la generación de residuos no es muy significativa, se reduce a los estériles de cantera, pero por su gran magnitud pueden producir impactos visuales y afectaciones a los ecosistemas.

Tabla 8.5. Producción de rocas para la construcción en España

	Unidad	2000	2003	2004
Yeso	kt	11.000	12.000	12.800
Calizas y dolomías	kt	232.000	243.000	258.400
Cuarcitas	kt	9.000	10.000	10.700
Margas	kt	13.000	14.000	14.900
Arcillas	kt	53.000	56.000	59.700
Arenas y gravas	kt	110.000	116.000	123.500

1.1.4. «El carbón verde»

A raíz de la aparición de las primeras inquietantes muestras del cambio climático y frente a la inercia de poner en marcha un decidido plan de energías renovables, cada día va tomando más cuerpo el concepto de «carbón limpio» entendiéndose por tal el conjunto de tecnologías que permitan su empleo masivo sin las servidumbres que su conversión energética entrañaba. Los expertos aseguran que en 2030 el consumo mundial de carbón se habrá triplicado y este recurso energético será el principal componente del mix eléctrico español en aquel año.

El principal ingrediente del uso del carbón es la tecnología de la gasificación ya que el gas de síntesis generado puede usarse en una turbina de gas lo que convierte a este proceso en un sistema eficiente, sobre todo en ciclo combinado, y no contaminante. No obstante, es obvio que la cantidad de CO_2 emitida seguirá siendo de origen fósil. Es decir, en el caso de España un modelo incompatible con el cumplimiento del Protocolo de Kyoto.

Otra modalidad de tecnología limpia para el empleo del carbón es la quema del carbón en un lecho fluidizado usando la piedra caliza como una parte del árido con lo que las emisiones disminuyen, si bien aumentan las de CO_2. Otra área de futuro, muy experimentada en Sudáfrica, es la obtención de combustibles líquidos a partir del carbón.

Finalmente es de esperar que en el decurso de los próximos veinte años, las técnicas del secuestro de CO_2, a que se hace referencia al final del Capítulo 6 de esta obra, hayan mejorado y sean más rentables.

1.2. LA INDUSTRIA MINERA DEL CARBÓN EN ESPAÑA

En lo concerniente a las actividades extractivas de carbón puede hacerse una primera gran estimación para evaluar el impacto de las actividades extractivas: las minas subterráneas presentan un impacto ambiental muy inferior a las de superficie. Tampoco estas presentan el mismo nivel de impacto. Algunas de ellas, de manera similar a las explotaciones de minerales metálicos presentan un impacto importante debido a la cada vez mayor relación estéril/mineral y las aguas ácidas. Como consecuencia inmediata aparece la problemática de los lixiviados, la ocupación de espacio, la restauración con el reequilibrio de los ecosistemas y el impacto visual.

Las presas de residuos de minería presentan, a diferencia de las escombreras, una problemática especial. Los residuos, habitualmente lodos, están sometidos a la acción del agua con pH generalmente alejados del 7 y las consecuencias son diversas. Por ejemplo, la oxidación de la pirita, FeS_2, genera ácido sulfúrico H_2SO_4, y hierro que precipita en forma de hidróxido $Fe(OH)_3$. Ello supone una constante lixiviación con el peligro de percolación. Además la constante aportación de residuos facilita una deposición de elementos pesados hacia el fondo, lo que se traduce en un aumento de la presión hidrostática en el fondo con consecuencias fatales, como aconteció en la presa de Aznalcóllar (Huelva, España). Otro efecto pernicioso es la salinización de las tierras. Las minas de potasa del Bages (Barcelona, España) presentan un residuo que es, básicamente sal, muy soluble, hasta 300 g/l, en el caso del ClNa. El agua de lluvia disuelve y arrastra el agua salada hacia el río salinizando todos los terrenos de la cuenca. Este impacto debe preverse antes de la explotación y planificar las actuaciones. De lo contrario acaba afectando al freático.

En el punto 1 del DVD adjunto se muestra información sobre las nuevas aplicaciones del carbón.

1.2.1. La revegetación de las explotaciones mineras

Se trata de una actividad encaminada a minimizar el impacto ambiental a base de restituir la cubierta vegetal en explotaciones mineras a cielo abierto.

Con el fin de adecuar las tierras y conseguir una nueva cubierta vegetal en el menor tiempo posible, se añade al terreno, una vez extendida la tierra vegetal (que, en principio debería ser la retirada del mismo lugar al inicio de la actividad), los siguientes productos:

- *Mulch:* se trata de una cubierta orgánica o inorgánica que protege al suelo y a la semilla depositada en el mismo. Además proporciona las siguientes ventajas: Reduce el impacto mecánico de la lluvia. Ofrece mayor resistencia a la erosión. Mantiene más uniforme la temperatura del suelo. Retiene el agua y reduce la evaporación. Estimula la germinación y, si es de naturaleza orgánica, enriquece el suelo al descomponerse. En la composición del mulch se usan subproductos como la paja, la celulosa y el papel.
- *Estabilizadores:* Son materiales orgánicos o inorgánicos que aplicados en soluciones acuosas penetran en la superficie del suelo, reducen la erosión por aglomeración física de las partículas, propiciando la formación de enlaces coloidales, con lo que retienen más agua y aumentan la porosidad mejorando así la estructura del suelo.
- *Abonos:* En el sistema de la hidrosiembra es obligado el uso de abonos. Es preciso que los abonos sean de asimilación lenta y poco solubles. Los abonos de asimilación lenta son los que contienen gran cantidad de materia orgánica, formados por harinas de huesos, cuernos, pezuñas, plumas, carnes, etc.
- *Especies herbáceas.* Las especies vienen determinadas por las condiciones climáticas, edáficas y sociales del lugar. Transcurrido un tiempo se puede llevar a cabo la plantación de árboles.

Según Hunosa (Empresa minera del Norte de España) una mezcla que ha dado buenos resultados es la integrada por:

Mulch	2.000 kg/ha
Estabilizador	200 kg/ha
Semillas	250 kg/ha
Abono	1.000 kg/ha

1.2.2. El problema de la erosión

La erosión hídrica depende, además de las características climáticas y de la naturaleza del suelo y del material litográfico, de la topografía y de la vegetación.

La incidencia de la agricultura sobre la erosión es fundamental. En el caso del cereal, dos meses después de la siembra, el grado de cobertura se acerca al 100%, por lo que la erosión que acontezca será leve y, en la mayoría de los casos despreciable.

En el caso español, los bajos contenidos de materia orgánica propios de nuestros suelos de secano, unidos a un laboreo continuado, conducen a una pérdida de estructura, especialmente después de la desaparición del humus.

1.3. GENERACIÓN DE ESTÉRILES EN LA MINERÍA

En minería el término estéril se refiere al residuo procedente de la actividad minera y, que por el momento, no es útil su aprovechamiento. No obstante es conveniente distinguir entre:

- *Estériles de mina:* Son los procedentes de la explotación de las galerías y trabajos en roca y se caracterizan por su irregular granulometría y no estar degradados. Representan, en general, un 10% de la producción total de estériles.
- *Estériles de lavadero:* Son los residuos sobrantes una vez separado el carbón en el bruto, procedente de la explotación de las capas mediante un proceso de lavado y se caracterizan por disponer de unas composiciones mineralógicas, granulométricas y químicas muy regulares y no estar degradados. Representan el 90% de los estériles y se subdividen en: *gruesos* (> 150 mm), *granos* (150-10 mm), *menudos* (10-1 mm) y *finos* (< 1 mm).
- *Estériles de escombrera:* Son los resultantes del almacenamiento de los estériles de mina y lavadero y se caracterizan por una granulometría al azar, estar disgregados y degradados. A su vez se subdividen en: *estériles rojos* (los que se han calcinado en la escombrera) y *estériles negros*.

La cantidad de estéril es una función de la calidad del mineral que se extrae. Así para el carbón del norte de España la fracción de estéril oscila al-

Tabla 8.6. Análisis mineralógico de diversos estériles de carbón de Gran Bretaña

	MORLAIS (S. Gales)	SNOWDOWN (Kent)	THORNE (Yorks)	MADELEY (O. Midlannds)	CARDOWAN (Escocia)	BEDLAY (Escocia)
Cuarzo	15,5	19,2	23,8	17,7	23,9	18,3
Illita	26,0	35,0	34,	23,0	9,0	7,0
Illita/Montmorillonita	18,0	15,0	6,0	15,0	7,0	10,0
Caolinita	3,4	8,4	8,5	15,0	35,0	39,0
Clorita	2,3	6,4	7,0	2,4	2,6	2,0
Alófana	1,9	1,4	1,4	1,9	1,9	1,8
Siderita	1,8	1,4	6,5	1,5	6,4	5,3
Materia carbonosa	26,5	10,3	6,7	17,6	12,1	14,6

rededor del 38% de la cantidad de mineral extraído. Teniendo en cuenta que la producción bruta de esta zona se acerca a los 12 millones de toneladas, el residuo se puede evaluar en 4,5 millones de toneladas.

Por regla general la minería del carbón, al menos en la UE, presenta cada vez una riqueza en mineral más pobre lo que se traduce en una mayor generación de estériles. A su vez, esto debe ser un acicate para intentar aprovechar, en lo posible los estériles. La Tabla 8.6 indica el análisis mineralógico de diversos estériles de carbón del Reino Unido.

Por lo que respecta a su caracterización, la Figura 8.1 muestra la composición mineralógica según granulometría. En general se trata de un material con una fracción arcillosa importante formada por illita, caolinita, clorita, etc. El cuarzo está presente en todas las fracciones, siendo más importante en la fracción gruesa. En cambio la materia orgánica abunda más en los finos.

Composición de estériles de carbón

La Tabla 8.7 y la Tabla 8.8 reproducen los análisis químicos de los carbones más representativos de algunos países.

En dichas tablas se especifica el análisis químico de cada una de las fracciones según el corte granulométrico.

El poder calorífico de los estériles de carbón

La Tabla 8.9 reproduce los poderes caloríficos superiores de los diferentes tipos de estériles correspondientes a diversos países productores de carbón. En la misma se puede observar que:

- El poder calorífico aumenta al pasar de los granos gruesos a los finos.
- Para cada tipo de estéril existen diferencias considerables entre los valores de cada país. Ello obedece a que el carbón se formó dentro de las rocas que dan lugar a los propios estériles.

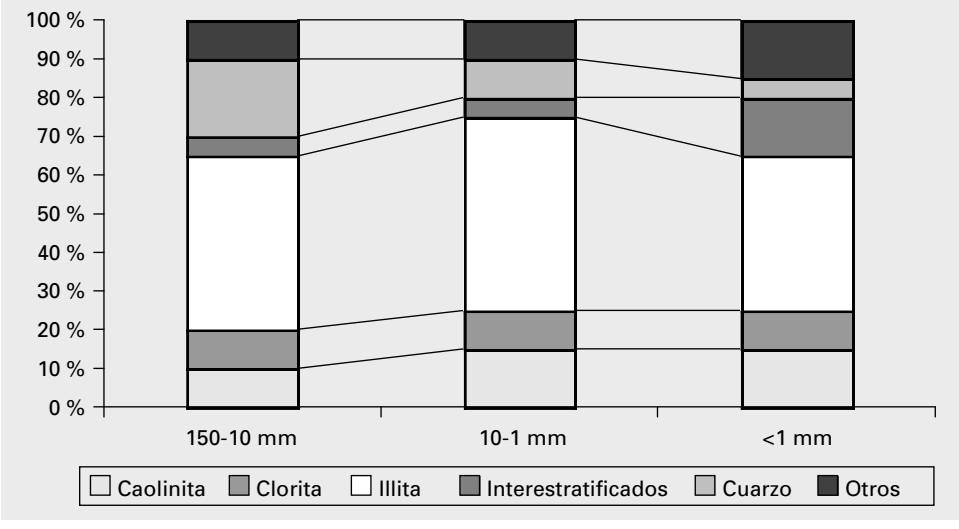


Figura 8.1. Caracterización de estériles de carbón y mineralogía según granulometría.

Tabla 8.8. Análisis químicos de carbones

Compuesto	Australia			Brasil			Checoslovaquia				Francia	
	Norte		Lavadero Coalcliff	Estériles			Ostrava-Karvina		Kladno		Lavadero	Rojos
	Lavadero	Rojos		Piríticos	Pizarrosos	Arcillosos	Granos y M.	Finos	Granos y M.	Finos		
SiO_2	(64,0)	(65,5)	(67,4)	43,3	59,4	58,2	50,6	52,6	52,1	35,9	(45-55)	52
Al_2O_3	(24,8)	(25,1)	(24,6)	33,3	33,5	34,4	19,2	27,8	24,2	21,8	(25-30)	30
Fe_2O_3	(3,0)	(3,6)	(2,8)	12,7	3,2	3,0	5,7	5,1	3,5	2,0	(5-8)	7
TiO_2	(0,9)	(0,77)	—	—	—	—	0,8	0,9	0,6	0,6	(0,6-1)	—
CaO	(0,27)	(0,27)	(0,3)	—	—	—	1,1	1,7	0,4	0,3	(1-2)	1,5
MnO	—	—	—	—	—	—	0,1	0,1	0,1	Trazas	—	—
Na_2O	(0,15)	(0,18)	(0,2)	-—	—	—	0,8	0,2	0,5	0,1	(0,5-1)	—
K_2O	(2,59)	(2,79)	(2,3)	—	—	—	3,0	3,0	1,8	2,0	(2-5)	4
MgO	(0,73)	(0,97)	(0,6)	—	—	—	1,6	0,6	1,0	0,5	(1-2)	1,5
S, Total	0,25	(0,03)	0,2	10	—	—	1,0	0,7	0,8	0,7	0,5-1,5	1,0
C	30,4	(0,18)	24,0	—	—	—	10,4	34,2	8,4	28,6	—	—
Pérdidas por calcinación	—	—	—	—	—	—	16,6	36,0	15,7	15,7	0,25-12	—

Tabla 8.7. Análisis químicos de carbones sobre muestra calcinada

Compuesto	Alemania			España		
	Granos	Menudos	Finos	Granos	Menudos	Finos
SiO_2	(59,8)	(57,0)	(53,3)	49,2 (55,5)	47,1 (55,6)	43,1 (56,0)
Al_2O_3	(23,9)	(24,9)	(24,9)	21,7 (24,9	23,7 (27,9)	23,2 (30,2)
Fe_2O_3	(7,1)	(8,2)	(9,0)	6,8 (7,8)	5,3 (6,2)	4,6 (6,0)
TiO_2	(1,1)	(1,1)	(1,0)	1,1 (1,3)	1,2 (1,4)	1,1 (1,6)
CaO	(0,5)	(1,0)	(2,0)	1,4 (1,6)	1,1 (1,3)	2,0 (2,5)
Na_2O	(0,9)	(1,1)	(0,9)	0,4 (0,5)	0,4 (0,5)	0,3 (0,4)
K_2O	(4,2)	(4,3	(4,3)	3,0 (3,3)	3,2 (3,8)	2,9 (3,8)
MgO	(1,8)	(1,7)	(1,8)	1,5 (1,7)	1,4 (1,6)	1,2 (1,5)
V_2O_5	—	—	—	0,25 (0,3)	0,22 (0,3)	0,22 (0,3)
S, Total	(0,66)	(1,4)	(1,8)	0,6	1,	1,0
C	6,2	12,5	—	3,5	5,5	11,4
Pérdidas por calcinación	—	—	—	13	15	18

A lo largo de los años el mejor aprovechamiento de las minas, el agotamiento de los recursos y el diseño de equipos de combustión más eficientes y capaces de quemar carbones más pobres ha conducido a una paulatina utilización de carbones de menor poder calorífico.

En este sentido es digno de mención los avances realizados, en estos últimos tiempos, en el desarrollo de los hornos de lecho fluidizado para la valorización de la fracción carbonosa que contienen los estériles de carbón.

Como indica la Figura 8.2 existe una correlación entre el contenido en cenizas de los estériles (C) y el

Tabla 8.9. Poder calorífico superior de estériles de carbón (kJ/kg)

País	Granos	Menudos	Finos
Australia	18.360		
Bélgica	<7.000	>7.000	
Chequia	3.100	4.300	6.700
Francia	1.700	—	5.000
Alemania	2.000	4.000	6.000
España	220	3.500	5.500
Reino Unido	5.000	—	8.000
URSS	4.400	—	6.600

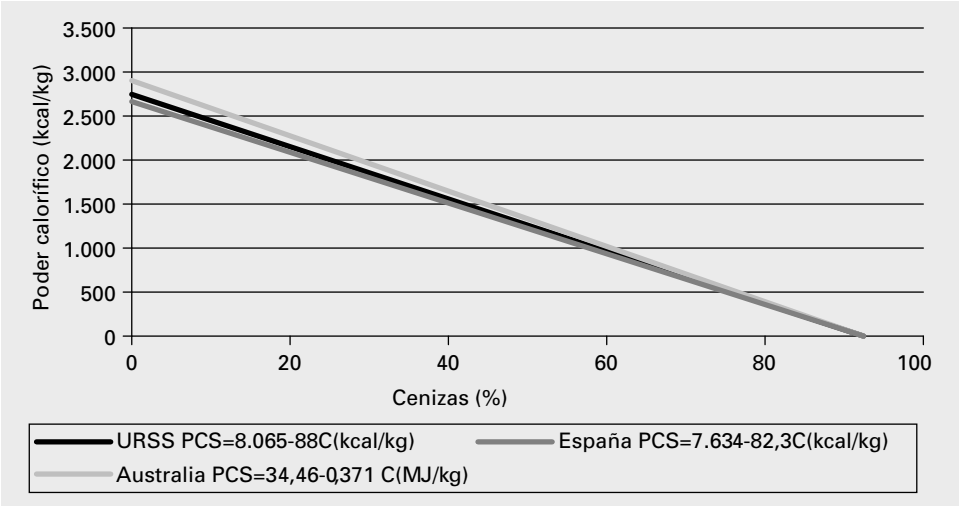


Figura 8.2. PCI de carbones en función del contenido de cenizas.

poder calorífico superior (PCS) que, a su vez responde a la expresión analítica:

$$PCS = 7.634 - 82,3 \cdot C \text{ (kcal/kg)}$$

1.3.1. Generación y empleo de estériles de carbón

Debido a la gran cantidad de material, los estériles se han usado con más o menos intensidad en numerosos países. Así en España, al margen del uso interno para el propio relleno de subterráneos, de una manera sistemática han comenzado a emplearse recientemente para otras finalidades, tal y como indica la Figura 8.3.

De la citada figura se infiere que, aproximadamente el 40% de los estériles vuelve a introducirse como relleno de los pozos y otros usos internos. Tan solo un 10% tiene aplicaciones externas.

En Polonia se destina gran cantidad a la construcción de obras públicas (carreteras, diques, etc.). Se usan grandes cantidades para la fabricación de clínquer, la fabricación de árido ligero y cerámica. El uso total de estériles se evalúa en un 20% de la producción.

En el Reino Unido se destinan más de 7 millones de t/año como relleno normal de carreteras y terraplenes de ferrocarril o bien el relleno de lugares abandonados. En Rusia las aplicaciones son similares pero la tasa de reciclaje es mayor por cuanto se había comenzado la valorización a primeros de la década de los cuarenta.

La Figura 8.4 esquematiza el tratamiento de los estériles para su posterior uso. (En la figura las cifras indican mm).

1.3.2. Los estériles en las grandes obras públicas

Por lo general las grandes obras civiles ocupan unas áreas muy importantes y modifican las características de la región o, al menos, la zona por donde transcurre. Desde el punto de vista ambiental sus efectos son claros en la fauna, a veces se reduce su movilidad, la flora, se altera la hidrología, tanto la superficial como la subterránea, lo cual, a su vez, puede repercutir en la disponibilidad de los recursos hídricos o aumentar el riesgo de inundaciones o la estabilidad o erosión del terreno. Pérdida de estética, empeoramiento de la calidad de vida: gases contaminados, ruidos, vibraciones, etc.

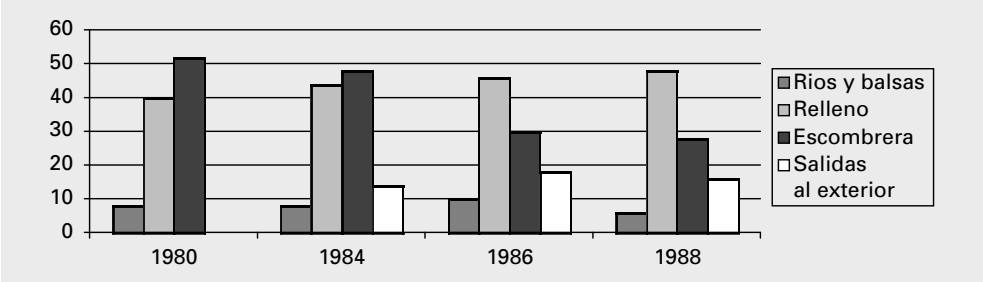


Figura 8.3. Reutilización de estériles de carbón.

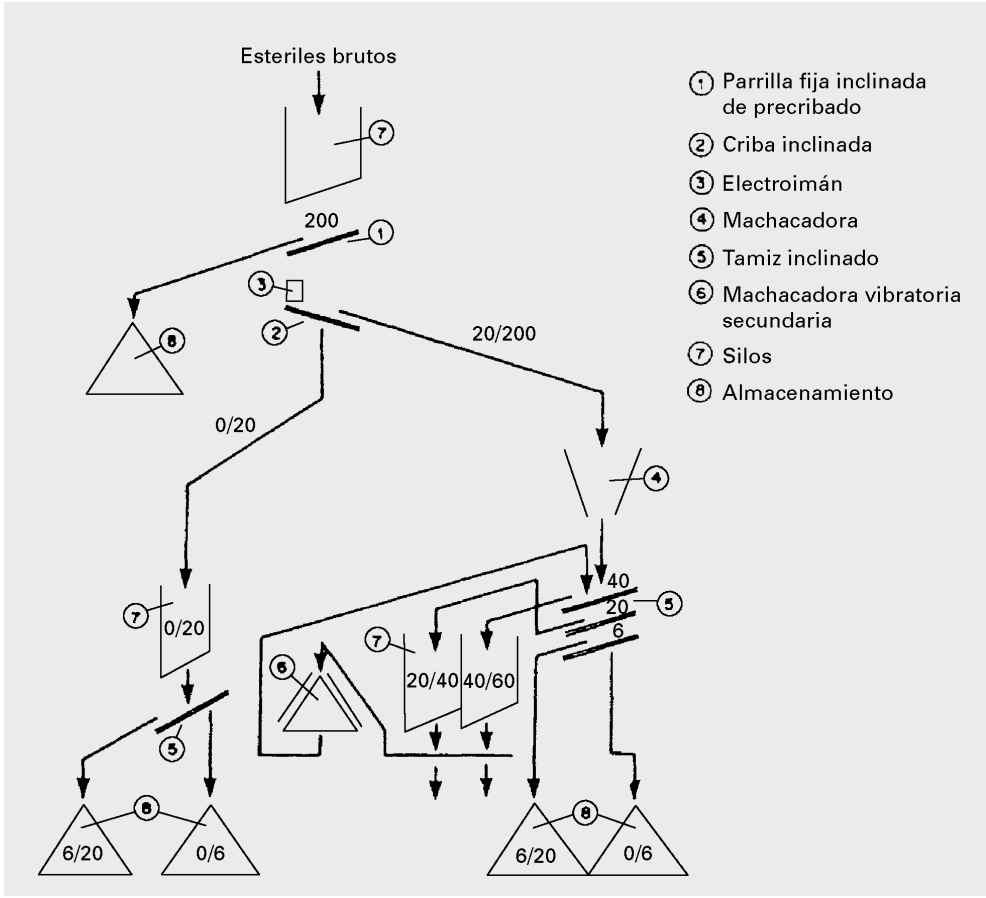


Figura 8.4. Tratamiento de estériles para reciclaje.

Las grandes vías de comunicación precisan de mucho espacio y causan un importante movimiento de tierras. Si las comunicaciones transcurren en terrenos planos y sedimentarios se destruye el suelo de interés agrícola y, si el paraje es muy accidentado obliga a grandes movimientos de tierras. Hay aspectos, como la erosión del suelo y la estabilidad de los taludes que están directamente relacionados con estas obras.

El aumento de las pendientes de los taludes proporciona una mayor velocidad al agua de superficie que, junto a la desprotección del suelo, permite una rápida erosión.

Después de años de investigación, en diversos países se ha llegado a la conclusión de que los estériles de carbón constituyen un buen material para la construcción de terraplenes, como el que aparece en la Figura 8.5, donde se aprecia una sección transversal y una foto (Figura 8.6) de un terraplén construido para una carretera en Asturias (España).

Teniendo en cuenta los requisitos exigidos por las correspondientes normas de obras públicas, los estériles cumplen los mismos requisitos que los materiales usados con asiduidad, sin tener necesidad de llevar a cabo tratamiento previo alguno.

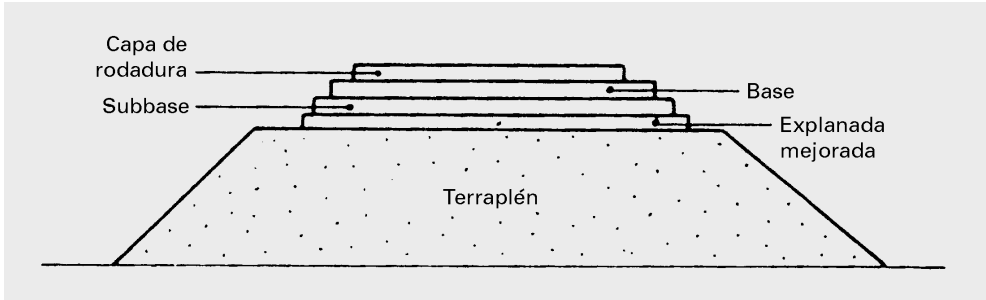


Figura 8.5. Esquema de construcción de un terraplén con estériles de carbón.

Figura 8.6. Fases de construcción de un terraplén con estériles de carbón.

Las normas suelen ser muy exhaustivas pero la experiencia enseña que lo más importante es:

- Realizar una compactación muy escrupulosa.
- Obtener unas capas de relleno densas.
- Reducir la penetración del aire con lo que se evita el peligro de autocombustión del carbón.
- La PG3 limita el contenido de materia orgánica a un 0,05% (se entiende materia orgánica degradable. Aparte del propio carbón contenido).
- Minimizar las infiltraciones de agua con lo que se reduce al mínimo es el riesgo de lixiviación.

1.3.3. Ladrillos a partir de estériles de carbón

Una de las formas más racionales de valorización de los estériles es su empleo en procesos que precisen energía, como la fabricación de cerámica o de clínquer. La fracción combustible de los estériles aporta energía y la parte inerte, que se valora como una materia prima, se integra en la matriz cerámica. En nuestro país, la sociedad Hunosa ha proporcionado grandes cantidades de estériles de granos y menudos a diversas cerámicas del norte de España.

Existen dos variantes básicas en la valorización de los estériles:

- Mezclándolo en cantidades limitadas con la arcilla.
- Fabricando cerámica sólo con estériles.

Como sea que el primer caso ya se ha desarrollado en un capítulo anterior (Capítulo 5), en el presente se incidirá sólo en la segunda variante.

Los estériles se trituran de modo que un 45-50% sea < 100 mm y el resto no supere los 2 mm. Esta distribución debe ser así para potenciar la plasticidad (fracción fina) y la fracción más gruesa para facilitar las etapas de secado y cocción cerámica.

El factor limitante del uso de los estériles como única materia prima cerámica es el contenido en carbón, que no debe superar el 6%, aunque serían recomendables valores más bajos.

La otra precaución importante es el diseño de la curva de cocción para favorecer una oxigenación correcta antes de alcanzar la zona de cocción, y evitar defectos típicos de esta fabricación.

Usando en la pasta cerámica un desgrasante como la chamota, permite el empleo de grandes cantidades de estériles de carbón. Así, con arcillas de interés cerámico, se han realizado pruebas satisfactorias con:

- 20% de arcilla.
- 60% de estériles finos.
- 20% de chamota.

Cocidos a 1.150 ℃, los materiales presentan una porosidad del 4,5% y una contracción del 8%. En este tipo de ensayos, el prensado siempre ofrece ventajas frente a la extrusión. Además la curva de calentamiento debe ser muy suave, y con exceso de aire, para evitar la presencia de corazón negro en el interior de las piezas cocidas.

1.3.4. Uso de estériles para la fabricación de áridos expandidos

Para la fabricación de áridos ligeros se pueden usar los estériles de carbón ya que, mineralógicamente son rocas arcillosas y poseen un contenido de carbón que sirve, al combustionar, como agente de expansión. Por tanto el estéril puede usarse como materia prima

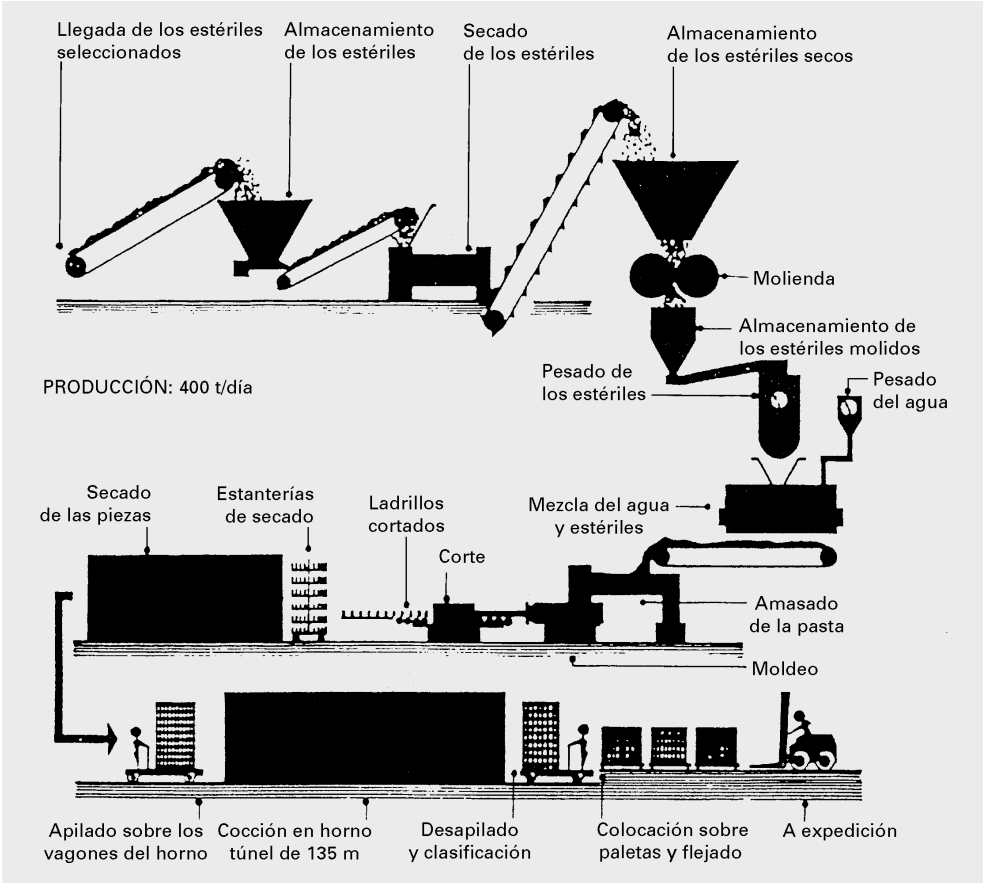


Figura 8.7. Fabricación de ladrillos con estériles de carbón.

para esta producción como se ha llevado a cabo desde hace mucho tiempo en Bélgica, Francia y Polonia.

La fabricación de áridos expandidos exige la expansión de pizarras, esquistos u otras familias de arcillas lo que no es un problema nimio ya que existen dos factores que deben suceder simultáneamente:

- El material ha de alcanzar una temperatura tal que le permita adquirir un estado viscoso.
- Paralelamente debe producirse un desprendimiento de gas en el interior del grano, de forma que se produzca la expansión. A la vez la superficie ha de quedar, prácticamente, vitrificada de manera que los gases ocluidos en el interior desarrollen cierta presión para vencer la tensión superficial de la superficie viscosa. Ello también ayuda a la expansión.

El ceramista Riley fue el primero un sistematizar, en un diagrama triangular la composición que deben tener los minerales de arcilla para ser expandibles. Así, como muestra la Figura 8.8, una arcilla expandirá si su composición cae dentro de la denominada «zona de Riley». En la misma figura se ha representado la posición de diversos estériles de carbón procedentes de las minas del norte de España.

Con todo, siendo ello condición necesaria no es suficiente ya que además se debe controlar:

- La curva expansión/temperatura. Tanto en atmósfera oxidante como reductora, que permita determinar el intervalo de temperaturas en el que se produce la expansión. Cuando mayor sea la diferencia entre la temperatura en la que se inicia el reblandecimiento y la temperatura en la que comienza la fusión, mayor es la posibilidad de éxito.
- La temperatura en que tiene lugar el desprendimiento de gases. Si estos son insuficientes se puede recurrir a residuos, como ciertos estériles de carbón. Precisamente se persigue que los gases escapen a la temperatura a la cual se inicia el reblandecimiento de la masa amorfa.
- La velocidad de calentamiento. Una velocidad lenta provoca una homogeneidad de temperatura, entre la superficie y el núcleo del árido, que impide la expansión. Un gradiente aconsejable, según la mezcla, puede ser del orden de 500 ℃/mín.

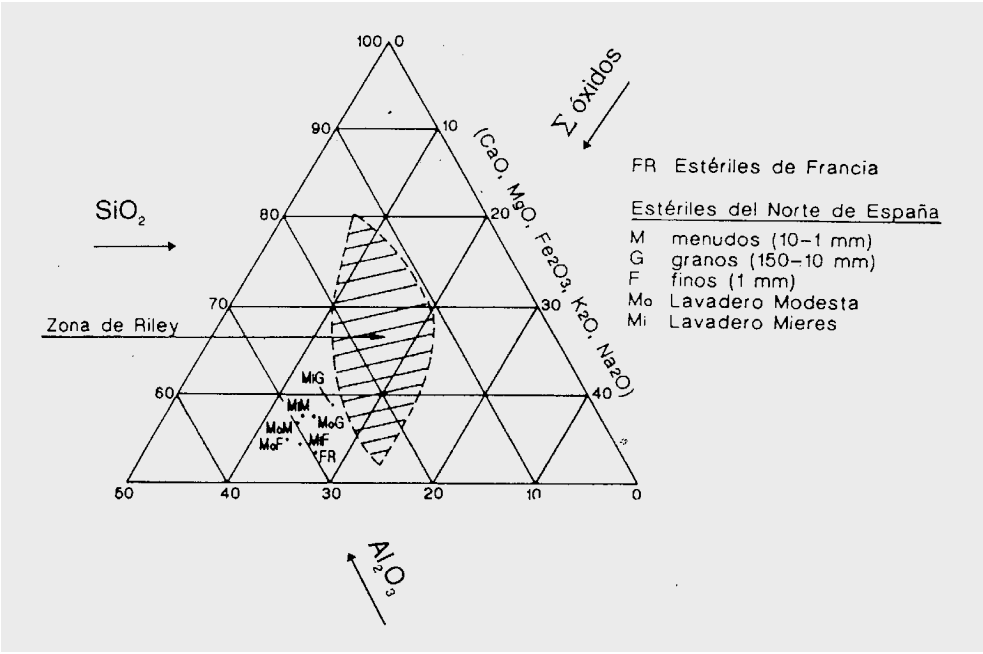


Figura 8.8. Estériles de carbón expandibles.

La obtención de áridos ligeros a partir de solo estériles de carbón es difícil (se hallan ligeramente fuera de la zona de expansión de Riley). Sin embargo es relativamente fácil obtener áridos de densidades del orden de 400 kg/m^3 cuando, a los estériles se les adiciona una proporción del 25% de polvos de acería.

1.3.4.1. Descripción de la tecnología usada para la expansión

La fabricación de áridos expandidos para la valorización de residuos es una técnica de reciclaje que se halla en franca expansión. Partiendo de la base de que la calidad del árido puede presentar una gama de propiedades muy amplia en función de su aplicación, la tecnología de fabricación de áridos ligeros puede ser muy variable.

Si se trata de inertizar o limitar mucho la movilidad de determinados metales pesados, como los presentes en las escorias de las incineradoras de RSU, para mezclarlo con una arcilla local disponible que, con probabilidad no aportará los requisitos normales para fabricar un árido estándar, se puede usar la tecnología a sabiendas de que el árido producido no servirá para adicionar a ciertas calidades de hormigón. No obstante podrá usarse como relleno para grandes obras públicas. Un árido poroso puede cumplir con las propiedades mínimas que evite la lixiviación y permita realizar la función primordial: valorizar un residuo y convertirlo en material de construcción.

Aunque existen varios sistemas el más común es el horno rotativo. El proceso comienza con la clasificación y dosificación del estéril al objeto de tener una mezcla con un poder calorífico determinado (que corresponde a un contenido en carbón del 4% al 5%) que es secada y molida por debajo de las 500 μm.

La masa humectada se extruye en una boquilla de diversas salidas de diferentes diámetros de 5, 8 y 10 mm. Que, a la salida de la extrusora se cortan a una longitud equivalente al diámetro, siendo posteriormente secados.

Una vez secos los nódulos se someten a un complejo sistema de hornos rotativos. La temperatura máxima depende del tipo de pasta empleada y el ciclo térmico total puede oscilar sobre las 3 horas, con un consumo específico de 700 kcal/kg.

Tabla 8.10. Análisis químico de los finos de carbón

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	TiO_2	Resto
Estériles finos	43,1	23,2	4,6	2,0	1,2	0,3	2,9	1,1	21,6

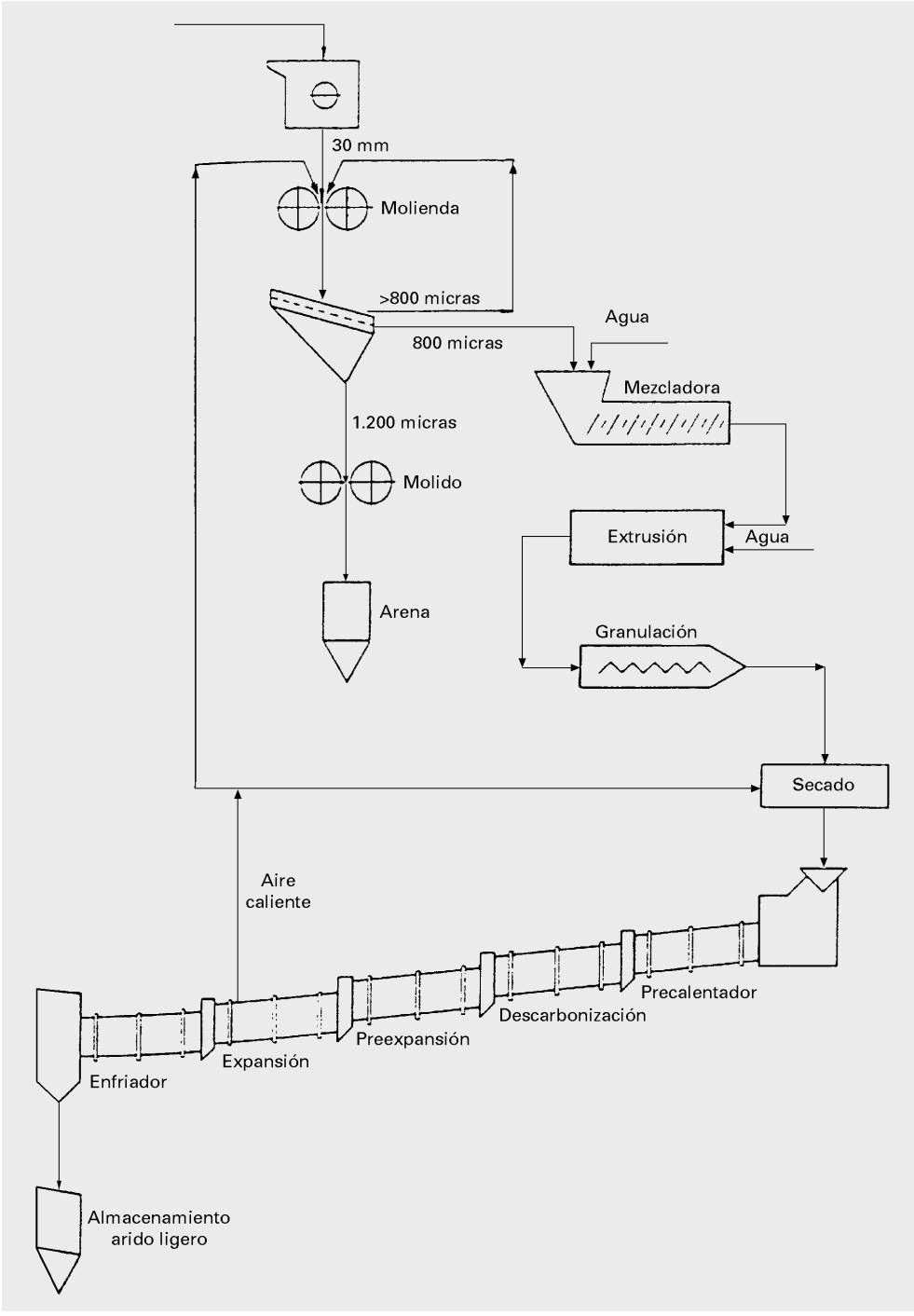


Figura 8.9. Esquema de la fabricación de árido expandido.

1.3.5. Empleo en la fabricación del clínquer

Teniendo en cuenta que los estériles de carbón son materiales arcillosos, pueden emplearse como materia prima en la producción del clínquer. La Tabla 8.10 muestra el análisis químico de los estériles finos de carbón procedentes de las explotaciones de carbón del norte de España.

Como es obvio, el carbón residual contenido en el estéril contribuye al ahorro energético del proceso. Minas de la Camocha desde hace años suministra más de 30.000 toneladas anuales a una cementera próxima, ambas situadas en el norte de España.

1.4. EL IMPACTO AMBIENTAL DE LOS COMBUSTIBLES FÓSILES

El consumo de energía en los países industrializados se divide, casi en partes iguales, entre la industria, el transporte y el sector terciario.

En el caso concreto de Cataluña (y en 2003), el carbón aporta cerca del 25% de la energía al sector industrial, de ahí la importancia de incluirlo en este apartado.

El impacto ambiental asociado, en el caso particular del carbón, afecta a la actividad extractiva (el carbón nacional es de mala calidad y cada vez se recurre más a las calidades de importación) sin embargo ha sido una actividad desarrollada secularmente y su huella es bien patente en muchas regiones de España. Por otra parte, hay que contemplar el impacto desde el punto de vista de su contribución al cambio climático. La quema de carbón contribuye a la aportación de CO_2 a la atmósfera pero también le acompañan una serie de contaminantes tanto gaseosos como sólidos.

De acuerdo con la extensión de los efectos que genera la extracción, transporte y consumo de combustibles fósiles se habla de: impactos globales, cuyos efectos tienen repercusión a grandes distancias, como es el caso de la producción de gases ácidos o gases de efecto invernadero, o bien de impacto regionales o locales, su zona de influencia se circunscribe a un área más pequeña. Tal sería el caso de la generación de cenizas volantes o de la alteración de la flora o la fauna local por la actividad de una central, o una línea de transporte.

1.4.1. Impacto ambiental sobre el medio natural

La generación de energía, en cualquiera de sus formas, implica una afección más o menos intensa al medio ambiente. Las energías primarias presentan un fuerte impacto en su fase de extracción, una afección menor en el caso de la transformación (con excepción de las refinerías) y un impacto importante en la etapa de transformación.

Las repercusiones ambientales del uso de la energía abarcan a los tres vectores clásicos del medio ambiente:

Efectos sobre la atmósfera: Es, sin duda, el impacto más importante ya sea como contaminantes primarios, en forma de gases contaminantes, o secundarios como los derivados de su uso. La energía en su conjunto, incluyendo básicamente el carbón, es la responsable de:

- El 90% de las emisiones antropogénicas de compuestos de azufre.
- El 90% de las emisiones antropogénicas de compuestos de plomo.
- El 85% de las emisiones de NO_x.
- Del 50 al 80% de las emisiones de CO_2.
- El 55% de las emisiones de COV's.
- Del 30 al 40% de las emisiones de CO.
- El 40% de las emisiones de material particulado.
- Del 10 al 40% de las emisiones antropogénicas de metano.

Efectos sobre el medio líquido: Las actividades extractivas producen alteración física y química de las aguas por medio de sedimentos o partículas en suspensión. En la etapa de transformación: las centrales térmicas afectan a las aguas superficiales debido a los sistemas de refrigeración. La alteración química en la fase de transformación es más patente en las refinerías.

Efectos en el suelo: En el caso del carbón afectan al medio físico y paisajístico. Tampoco hay que olvidar que el suelo es el último destinatario de los contaminantes que se emiten al agua y a la atmósfera.

1.4.2. Fuentes de energía de bajo impacto

En contraposición a los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural) cuyos impactos ambientales durante las etapas de extracción y consumo son importantes, las llamadas energías renovables se nutren de combustibles que se renuevan de manera constante y su fuente de energía primaria es inagotable, el Sol. Desde el punto de vista ambiental las energías renovables presentan impactos ambientales reducidos, que afectan en todo caso al ámbito local y su vigilancia y corrección es de una magnitud muy inferior al de los impactos que ocasionan los combustibles fósiles.

El aprovechamiento de recursos naturales, como la materia orgánica, con finalidad energética cumple una doble finalidad: elimina residuos del medio y ahorra en el consumo de combustibles fósiles. En este sentido los más asequibles son la biomasa forestal, la biomasa procedente de las actividades agrícolas y/o ganaderas y los residuos industriales derivados de industrias de transformación de madera y papel.

2. El sector de la generación de electricidad

La producción convencional de electricidad, desde el punto de vista ambiental, es uno de los focos de contaminación más importante y, presumiblemente el problema se incrementará ya que la demanda de electricidad seguirá creciendo. El problema se agrava en España puesto que un porcentaje muy elevado se fabrica a partir del carbón.

Los dos vectores contaminantes del sistema de producción de electricidad a partir de combustibles fósiles son:

- Residuos, como en el caso de las centrales termoeléctricas o nucleares de fisión.
- Contaminación atmosférica, como el caso de las centrales de gas, de carbón e incluso las de biomasa.

De hecho el llamado problema de la sostenibilidad de la generación de energía se enmarca, como reproduce la Figura 8.10, en un equilibrio entre tres parámetros.

Es preciso hacer unos breves comentarios sobre cada unos de los factores antes citados:

- *Seguridad de suministro.* Con la tecnología que se dispone hoy día, en los albores del siglo XXI, el potencial de generación de electricidad a partir de los combustibles fósiles conocidos no alcanza el 0,008% del total de todas las energías alternativas, o renovables, que la naturaleza pone a nuestra disposición. Es decir, este parámetro está bien asegurado, sólo es cuestión de ponerlo a trabajar.

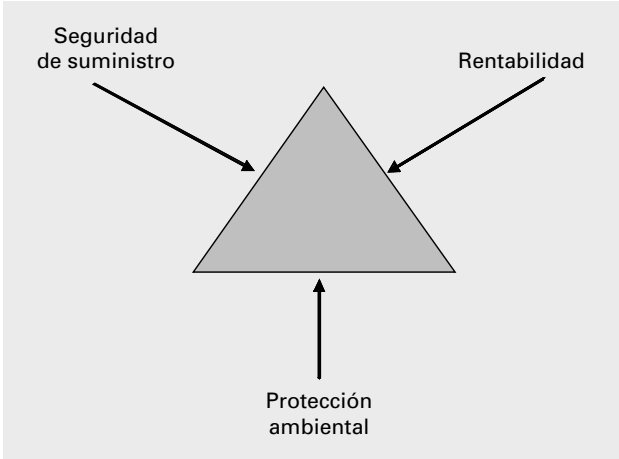


Figura 8.10. Parámetros que definen la sostenibilidad energética.

- *Rentabilidad.* La rentabilidad, en el caso de la generación de electricidad depende de dos factores: del precio relativo de los combustibles en comparación: la energía renovable, por definición es gratuita, por tanto el vector que hará decantar la balanza es la inversión y ello depende de la economía de escala. Mientras solo existan plantas de demostración el coste de inversión seguirá siendo alto. Los costes de explotación de una central termoeléctrica se reparten de la siguiente manera: un 80% el coste de explotación y un 20% la amortización de la inversión, cuando en una planta de energía solar térmica, el reparto es exactamente al revés. Con todo, a precios de 2006, el coste final es favorable a la renovable.
- *Protección del medio ambiente.* Es obvio que, al margen de algunos aspectos que se indicarán, todas las ventajas están al lado de las energías renovables.

En el punto 2 del DVD adjunto se muestra información sobre la generación de energías renovables, en particular sobre el Plan de Energías Renovables 2006-2007.

2.1. LA SOSTENIBILIDAD DE LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD

En el caso del estado español, en 2004 el papel de las energías renovables dentro de la cesta de suministro de energía primaria, como muestra la Figura 8.11, era escasamente del 4% y básicamente de naturaleza hidráulica.

El consumo de energía primaria en España, en 2004, fue de $90{,}5 \cdot 10^6$ tep, equivalentes a 996 TW · h, donde las energías renovables no representan en su conjunto más de 40 TW · h. El destino de la energía primaria fue:

- *Transporte 40,7%*. Donde se concentran esencialmente los derivados del petróleo. Muchos países van complementando esta cifra con combustibles renovables.
- *Industria 33%*. Desde el punto de vista energético se trata sin duda del sector más eficiente. Sin embargo, a excepción del sector de generación de energía eléctrica, que es el mas impor-

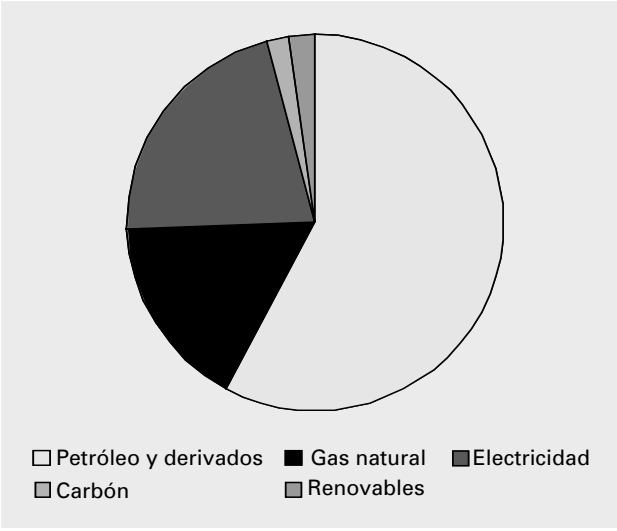


Figura 8.11. Energías renovables en la cesta de la energía primaria en España.

tante, las posibilidades de sustitución no son, por el momento muy elevadas.

- *Servicios y sector doméstico 26,3%*. Es un sector, como el transporte, en constante alza y con posibilidades de ahorro muy bajas.

2.1.1. Seguridad de suministro de las energías renovables

Definido el marco de lo que viene a denominarse sostenibilidad, la Tabla 8.11 muestra las posibilidades de las energías renovables, a partir del estado del arte de los medios de conversión eléctrica hoy en día disponibles.

Tabla 8.11. Potencial de las energías renovables

		Flujo (Potencia) TW	
		Mínimo	**Máximo**
Solar	flujo en tierra	27.000	81.900
	flujo en mar	53.000	720.000
Viento	«on shore»	100	3.000
Olas		200	6.000
Biomasa		30	900
Hidroeléctrica		40.000	1.200.000
Mareas		3	90
Geotérmica	hidrotérmica	3	75
	roca caliente	30	900
Combustibles fósiles (2003)		10	300
Total		**120.376**	**2.013.165**
% combustibles fósiles		0,008%	0,015%

Así pues, asegurado el suministro de energía primaria, vale la pena repasar el denominado «mix» eléctrico, es decir las diferentes fuentes de generación de energía eléctrica que, en el caso del estado español, son las representadas en la Tabla 8.12.

A excepción de las tres últimas, como muestra la Tabla 8.12 se trata de energías fósiles o no renovables. Es obvio que para lograr la sostenibilidad hay que invertir las cifras, en Europa ya existen países como Austria o Suecia donde las energías de origen renovable son mayoritarias en la cesta. Por otra parte el mix de energías renovables debe llevarse a cabo de tal forma que unas y otras: biomasa, solar, eólica, etc., se complementen, tanto a nivel de estado como de comunidad de estados. La Figura 8.12 muestra un ejemplo de cómo el Ministerio alemán de Medio Ambiente propone un intercambio de energías de diferentes fuentes en la UE.

Tabla 8.12. Mix de referencia del estado español en 2005

GENERACIÓN ELÉCTRICA 2005	
Convencionales	
Hidráulica	6,0%
Nuclear	17,1%
Carbón	23,0%
Fuel-Gas	24,5%
Ciclo Combinado	14,5%
Renovables	
Térmica	6,7%
Hidráulica	1,1%
Otras renovables	7,0%
Total	**100,0%**

Los países del área mediterránea están especialmente llamados a instalar plantas de energía solar térmica de nueva generación. Las zonas montañosas, Alpes y norte de Europa, tendrá preponderancia la energía hidráulica, mientras que la costa atlántica es favorable a la eólica. Además también hay que añadir la geotérmica y la biomasa.

Es evidente que ello tropieza con el problema del transporte eléctrico, bastante ineficiente hoy en día. Para salvar grandes distancias se debe recurrir a una forma más eficaz del transporte de energía: El CCAT (Transporte de Corriente Continua a Alta Tensión). El sistema consiste en una estación rectificadora situada al principio del tramo de transporte, que convierte la energía alterna generada en continua. En la

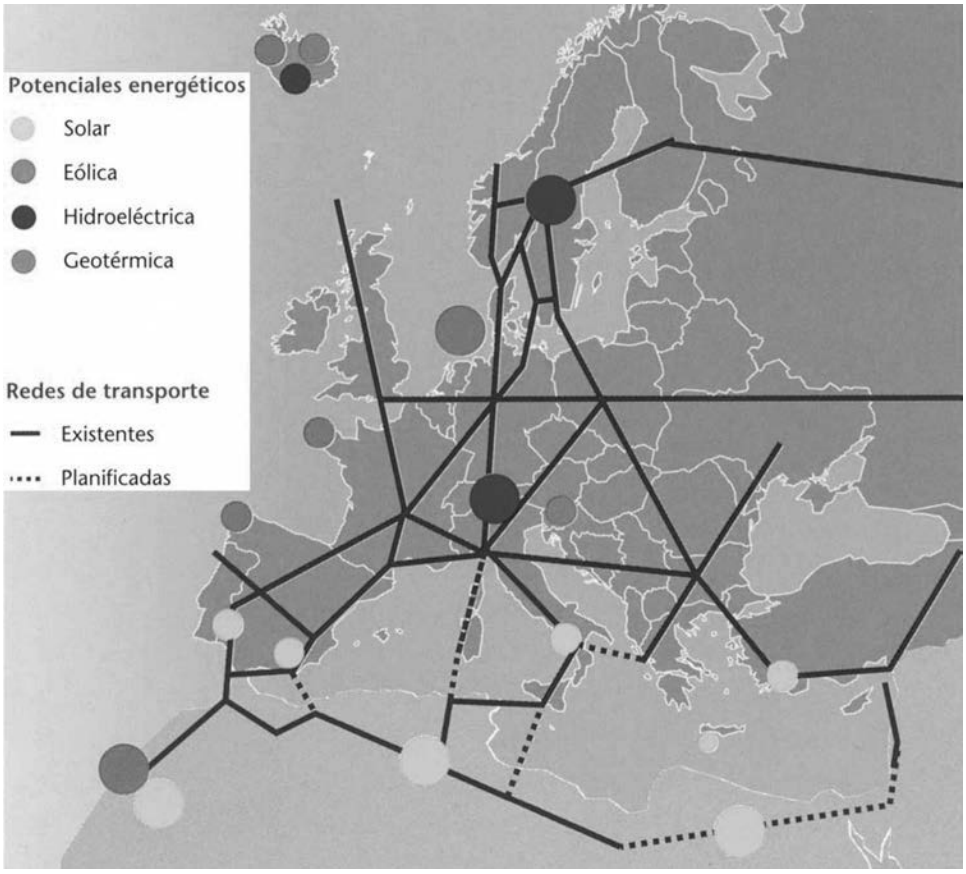


Figura 8.12. Mix energético del futuro en la UE.

recepción se vuelve a transformar en alterna. De esta manera se pueden transportar hasta 3.000 MW(e) a grandes distancias (se sobreentiende más de 2.000 km) con bajas pérdidas y a un coste reducido (esta técnica ya es usada en numerosas partes del mundo, en especial en tramos submarinos como entre Tasmania y el continente australiano).

2.1.2. Rentabilidad de las fuentes de suministro

Como con cualquier otra tecnología, las diversas formas de producir energía eléctrica a partir de energías renovables precisan de un factor de economía de escala. Así por ejemplo, en la década de los 1980 cuando comenzó la energía eólica, los generadores eólicos tenían una potencia entre 50 y 100 kW, mientras que en 2005 es normal encontrar generadores de 3 MW(e) en tierra y hasta de 10 MW(e) en el mar. La Figura 8.13 reproduce la disminución del coste de inversión según ha ido aumentando la potencia instalada.

Hay que señalar que en 2004, la potencia eléctrica de origen eólico, en España, superó a la potencia instalada de origen nuclear. Sin embargo, no hay que confundir la potencia instalada con la energía generada por cada fuente. En España, en 2004, la energía de origen eólico enviada a la red fue solo un tercio de la energía generada por las centrales nucleares.

2.1.3. Aspectos ambientales

Desde el punto de vista ambiental, las principales incidencias de la generación de energía son:

- Contaminación atmosférica.
- Efecto invernadero.
- Lluvia ácida.
- Agujero en la capa de ozono.
- Deforestación.
- Residuos tóxicos y peligrosos.
- Contaminación del agua.
- Desertificación.

Sólo a nivel de introducción se realiza un breve comentario de índole ambiental de cada uno de los sistemas convencionales de producción de energía eléctrica, con el propósito de contraponerlos a las renovables.

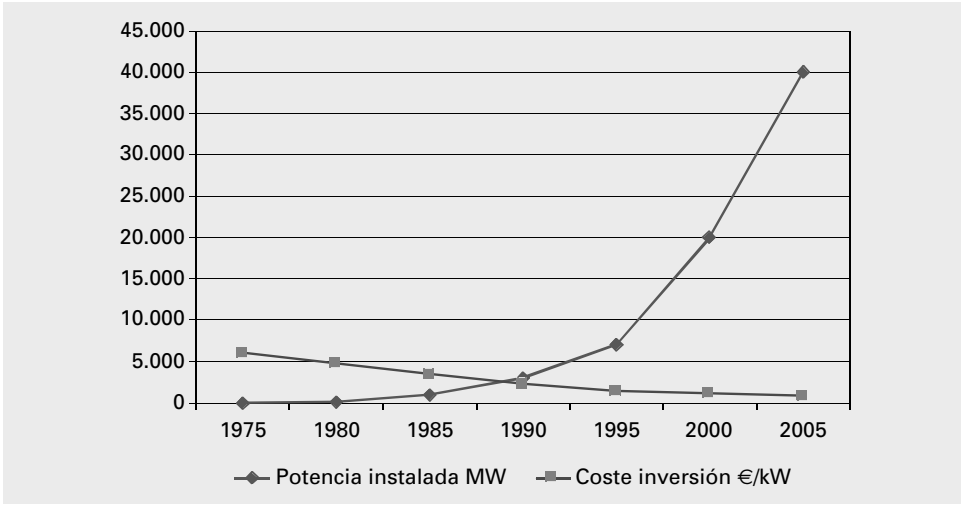


Figura 8.13. Inversión de energía eólica en €/kW en función de la demanda.

2.1.3.1. Térmicas de lignito

El lignito es un combustible fósil, de relativamente bajo poder calorífico; en las fases de extracción, tratamiento, transporte y combustión, genera importantes cantidades de residuos (estériles, lodos, escorias y cenizas), fuerte carga en el agua (pluviales, escurridos, sulfatos, sales, metales pesados y calores residuales) y en la atmósfera (partículas y gases diversos, específicamente, CO_x y SO_2). Su utilización se circunscribe a las centrales eléctricas a pie de mina, con explotación a cielo abierto. Necesita pretratamiento y la combustión se realiza con tecnologías especiales y aditivos (especialmente caliza). La energía térmica producida en la combustión se transmite a un ciclo Rankine agua-vapor, del que se extrae energía mecánica a través de una turbina, consumiendo grandes cantidades de agua en el condensador (en el caso de emplear torres de enfriamiento).

El CO_2 es el compuesto de referencia para la medición del impacto de cada contaminante sobre el calentamiento global, y las cantidades de otros compuestos que contribuyen a este impacto se expresan en términos de CO_2 equivalente. Para las restantes categorías de impacto las cantidades de todas las emisiones contaminantes se expresan en términos de kilos de CFC equivalente para la disminución de la capa de ozono; kilos de SO_2 equivalente para la acidificación; kilos de fosfatos equivalentes para la eutrofización; kilos de plomo equivalente para la categoría de impacto que hace referencia al vertido de metales pesados; kilos de PAH (hidrocarburos aromáticos policíclicos) equivalentes para los efectos carcinogénicos; kilos de SO_2 equivalentes para la niebla de invierno y kilos de eteno equivalentes para la niebla fotoquímica.

En las térmicas de lignito, la generación de residuos industriales conlleva, en primer lugar, problemas logísticos, de tratamiento, de disposición y de vigilancia, con un gran número de implicaciones económicas, sociales y políticas. A más largo plazo existen también implicaciones relacionadas con el agotamiento de las materias primas y recursos. La solución global pasa por la reutilización, el reciclado y la valorización, que permitan convertir el actual funcionamiento de una economía lineal de cadenas abiertas en otra de características cíclicas en las que el rechazo y peligrosidad de los materiales sean mínimos.

2.1.3.2. Térmicas de carbón

El carbón es un combustible de relativamente alto poder calorífico. Bajo esta denominación se incluyen mezclas de hullas y antracitas, incluso de carbones nacionales e importados para disminuir cenizas y contenidos en azufre. Produce importantes impactos en todas las fases de utilización: extracción, tratamiento, transporte y combustión. Especialmente, genera grandes cantidades de residuos (estériles, lodos, escorias y cenizas); produce fuerte carga al agua (pluviales, escurridos, sulfatos, sales y metales pesados, además de calores residuales) y a la atmósfera (partículas y gases diversos, específicamente, CO_2 y SO_2). La explotación se hace en minas a cielo abierto o subterráneo; necesita pretratamiento y combustión. La energía térmica producida se transmite a un ciclo Rankine agua-vapor del que se extrae energía

mecánica a través de una turbina consumiendo grandes cantidades de agua en la condensación.

Diversos informes y estudios publicados en la Unión Europea, especialmente, el Libro Blanco de las energías renovables, estiman que, tanto los problemas ambientales como el agotamiento de los recursos energéticos, pueden minimizarse modificando la actual estructura energética, proponiendo un mix de energías en la generación de electricidad con un porcentaje de energías renovables que alcance al menos un 12% de la energía primaria.

No es fácil estimar el factor de equivalencia e impacto para los metales pesados debido a las grandes diferencias existentes entre regiones y a la distinta capacidad de afectación a menores y adultos.

En el punto 3 del DVD adjunto se muestra información sobre el Libro Verde y la estrategia europea para una energía sostenida.

2.1.3.3. Térmicas de petróleo

Los combustibles básicos derivados de él y utilizados en la generación eléctrica son el fuel-oil y otros derivados. Las emisiones de gases de refino, como en la combustión final generan SO_2, CO_2, NO_x, metano, C_xH_y y metales pesados. En las aguas, los contenidos de grasas y diversos materiales en suspensión son importantes: genera residuos, tanto en las fases de extracción como en la de almacenamiento y combustión (lodos, fangos, escorias y cenizas). La utilización de ciclos Rankine agua-vapor, diesel, etc., permite la transformación química/física y el aprovechamiento de calores residuales, en caso de cogeneración.

La trascendencia y magnitud que han adquirido los aspectos relacionados con el calentamiento global han permitido una profundización de su evaluación. Así, se dispone de suficiente información para estimar que, hoy en día, el contenido de gases de efecto invernadero en la atmósfera es un 25% superior al existente en los últimos 160.000 años. Debería procederse, pues, a una reducción del orden del 60% de las emisiones globales actuales.

De acuerdo con algunos informes procedentes de diversos organismos internacionales, se ha estimado que la temperatura aumenta 0,2 ℃ por década y, asimismo, que, de continuar las pautas de generación y consumo actuales, el incremento podría alcanzar los 0,3 ℃ por década. Este aumento situaría el cambio en unos 5 ℃ para el año 2050 en el Norte y Este de Europa, con la siguiente modificación climática, que afectaría al 20% de Europa.

2.1.3.4. Centrales de ciclo combinado

Las fases de extracción, transporte y combustión del gas natural producen variedad de impactos en la atmósfera al emitir diversos gases por escapes y en el propio proceso de combustión, también en las aguas, derivados de la fase de combustión (C_x H_y, cloruros, sulfatos y calores residuales), y cierta cantidad de residuos (estériles, lodos y resinas).

La utilización de ciclos Rankine agua-vapor, Otto, turbina de gas, ciclos combinados, etc., permite su transformación en trabajo, con diferentes eficiencias de transformación y emisión de calores residuales. El ciclo combinado es el de mejor eficiencia, ya que supera el 51%. Sin embargo, desde el punto de vista ambiental, al margen de la cantidad de CO_2 de origen fósil, es preciso citar la emisión de NO_x.

2.1.3.5. Centrales de fisión

Utilizan diversos derivados de uranio natural como combustible en las centrales. Las fases de minería y concentración, conversión, enriquecimiento, fabricación del combustible y las reacciones nucleares producen impactos sobre la atmósfera y el medio acuático y generan residuos de diferente intensidad. El calor generado en el reactor es aplicado a un ciclo termodinámico agua-vapor para su conversión en trabajo. Consumen importantes cantidades de agua en la refrigeración.

El factor de reducción que debe asignarse a los residuos radioactivos siempre es polémico, al igual que otros muchos aspectos relacionados con el sistema energético nuclear. A pesar de las discrepancias que pueden surgir, se considera que la peligrosidad asociada a los residuos de media y baja actividad es reducida, mientras que el riesgo asociado a los residuos de alta actividad es más elevado debido tanto a su largo periodo de semidesintegración, como a su radiotoxicidad.

Hay que tener en cuenta que las centrales nucleares en funcionamiento en el mundo, hasta 2005, corresponden a modelos de la denominada segunda generación. Entre otros problemas, es preciso destacar que el «agotamiento» del combustible nuclear es mínimo (en muchas centrales se debe proceder a la recarga de combustible, cuando escasamente se ha gastado un 10% del mismo). Ahí radica uno de los grandes impactos de las centrales de esta generación.

Radiaciones ionizantes: La relevancia de las sustancias radioactivas, al igual que las sustancias carcinógenas, depende de la proximidad de la población a las distintas instalaciones que son fuente de emisiones radiactivas.

2.1.3.6. Otros aspectos ambientales relacionados con las EERR

En contrapartida, al lado de los problemas ambientales derivado del empleo masivo de los combustibles fósiles, no todo va a ser ventajas para las energías renovables, al menos en el estado del arte del desarrollo de las tecnologías actuales. Sirva de ejemplo la superficie necesaria para explotar diversas fuentes de energía, mediante el ejemplo de la Figura 8.14 sobre la demanda eléctrica de Texas, de 270 TW · h (fuente: *State Energy Conservation*).

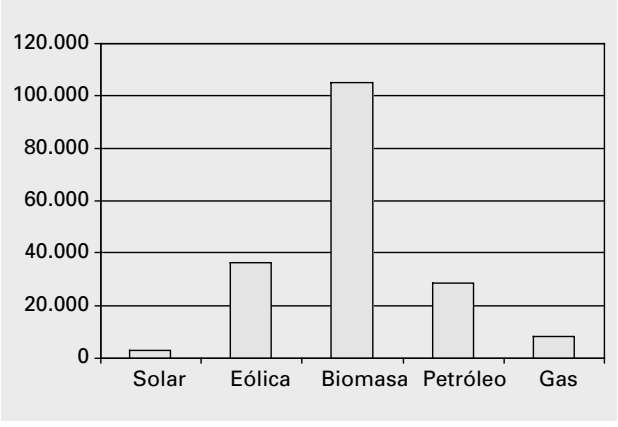


Figura 8.14. Superficie precisa (ha) para el abastecimiento de energía eléctrica al estado de Texas.

El estado de Texas tiene 22.490.000 habitantes y una extensión de 671.000 km^2. Los recursos fósiles, petróleo y gas (en el caso de que existan) precisan de una extensión y unas infraestructuras. Parece evidente que, en el caso de que se trate de una zona medianamente insolada, como es el caso del ejemplo que también se podría aplicar al levante y al sur de península ibérica, la opción más favorable es la instalación de energía solar térmica.

Para dar una idea de la ocupación de terreno que ello supone, si se elige un «mix» de generación de:

- 25% de fotovoltaica y solar térmica (esta última mayoritaria),
- 25% eólica,
- 25% biomasa, y
- 25% de convencionales.

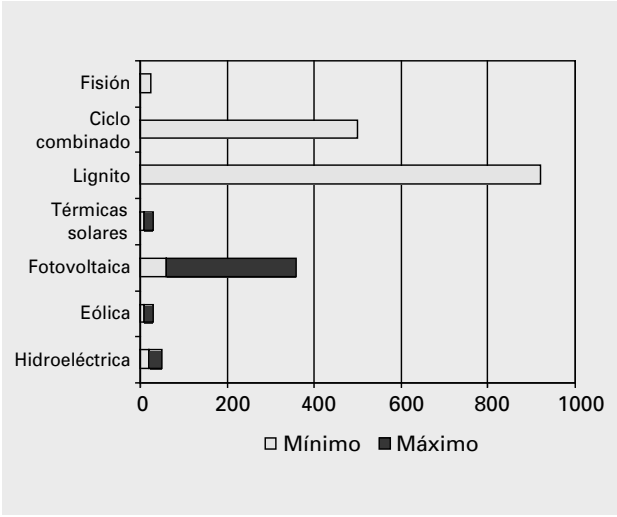


Figura 8.15. Equivalente de g CO_2/kWh.

La ocupación de terreno sería del orden del 3,5% del citado estado (representando la biomasa el 74%).

Solo para hacer referencia a la contribución a la generación de gases de efecto invernadero, en forma de g CO_2/kWh, la Figura 8.15 muestra la comparación entre las energías renovables y algunas fósiles.

2.2. VALORIZACIÓN DE RESIDUOS PROCEDENTES DE LAS CENTRALES TERMOELÉCTRICAS

Las centrales termoeléctricas que consumen carbón generan grandes cantidades de material particulado que es evacuado junto con los gases de combustión. Más tarde son captados en la estación de depuración de gases y constituyen las cenizas volantes. Habida cuenta de que, en España, cerca del 22% de la energía eléctrica se produce a partir del carbón y, en otros países esta cifra es muy superior, se puede tener una idea de la magnitud del problema.

2.2.1. Generación y tipos de cenizas volantes de centrales termoeléctricas

En España la generación de escorias alcanza el 1.304.000 t/año y las cenizas volantes 7.391.000 t/año de las principales centrales termoeléctricas españolas que consumen carbones.

La Tabla 8.13 facilita la composición química de las citadas cenizas volantes y en el diagrama ternario de la Figura 8.16 se sitúan dichas cenizas en función de los contenidos de SiO_2, Al_2O_3 y el resto de óxidos.

Tabla 8.13. Caracterización de cenizas volantes de centrales termoeléctricas españolas

Central térmica	Antr.	Bitu.	Lig.	C.V.	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	P.F.
Aboño	SÍ	SÍ	NO	44	29	11	4	0,5			4,0	6	
Aliaga	NO	NO	SÍ										
Avilés	X	X	X										
Badalona	X	X	X										
Compostela II	SÍ	NO	NO	31,0	50,44	25,93	7,78	2,20	1,67	0,23	0,68	3,85	2,90
Ensidesa	NO	SÍ	NO	24,46	49,70	30,20	5,52	4,90	1,50	0,67		6,04	
Escucha	NO	NO	SÍ	49,0									
Guardo	SÍ	SÍ	NO		46,7	22,8	9,85	6,10	2,70	2,60		2,60	10,0
Lada	NO	SÍ	NO										
Meirama	NO	NO	SÍ	11,48	49,3	35,2	5,1	6,4	1,10	1,0	0,15	0,35	2,0
Narcea	SÍ	NO	NO	25,0	53,6	25,8	7,11	4,09	2,21	2,53	0,70	3,80	
Pasajes	X	X	X										
Ponferrada	NO	SÍ	NO										
Puentes Garc,	NO	NO	SÍ	38,77	48,5	31,07	10,40	5,25	1,11	1,04	0,36	1,56	2,10
Puerto Alcudia	NO	NO	SÍ	18,81	8,47	3,73	54,74	1,12	9,48	0,58	1,01	1,65	
Puertollano	NO	SÍ	NO	34,50	62,65	22,84	8,08	1,34	1,21	0,55	0,20	2,23	
La Robal	SÍ	NO	NO	26,37	41,50	23,0	12,5	12,5	1,60	3,0	0,03	2,2	2,0
Cercs	NO	NO	SÍ	44,00	45,1	17,50	8,1	8,1	1,50	4,0		2,60	10,0
Soto Ribera	NO	SÍ	NO	35,0	49,6	26,6	9,8	9,8	2,3	0,3	0,70	4,0	0,85
Teruel	NO	SÍ	SÍ	31,20	48,9	24,1	16,12	16,12	0,63	3,90	0,14	1,51	

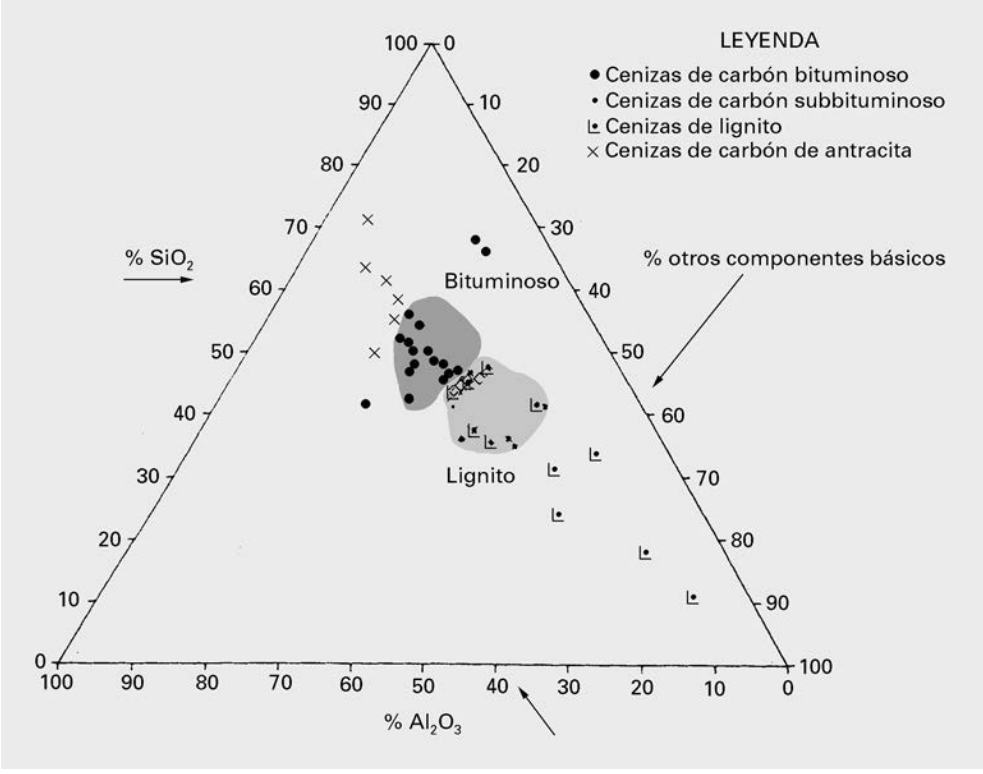


Figura 8.16. Situación de diversas cenizas volantes en el diagrama ternario SiO_2-Al_2O_3-óxidos.

2.2.1.1. Construcción de taludes, bases y subbases de carreteras a partir de cenizas volantes

Las cenizas volantes pueden usarse exitosamente en la construcción de taludes y terraplenes de carreteras. La enorme cantidad de material que suele emplearse para estos cometidos, así como los movimientos masivos de tierra precisos permiten utilizar notables cantidades de cenizas volantes.

Los taludes construidos con cenizas volantes presentan una estabilidad superior a la de los suelos arcillosos, por lo que son cada día más empleadas.

También se usan grandes cantidades en el relleno de muros de sostenimiento. Para rellenos especiales, las cenizas volantes presentan ventajas debido a su baja densidad y, sobre todo, a sus propiedades cementantes. Esta característica le confiere una rápida consolidación, una baja compresibilidad y una alta resistencia al esfuerzo cortante. El inconveniente más destacado es la probabilidad de congelación que se deriva de su distribución granulométrica.

Las cenizas volantes convenientemente mezcladas con áridos, cal y agua constituyen un material excelente que se usa en la construcción de bases y subbases de carreteras. Esta mezcla endurece progresivamente, dando lugar a un magnifico material de pavimentación. El espesor de la base debe ser de, aproximadamente, 13 cm para pavimentos destinados a tránsito ligero y de 25 cm para el pesado.

Frente a las claras ventajas económicas de la utilización de las cenizas volantes, existen unas problemáticas que pueden sintetizarse en:

- Desconocimiento del comportamiento a largo plazo de los pavimentos construidos con estas cenizas, ya que los estudios experimentales no lo pueden predecir.
- Limitación de los tiempos de fraguado impuestas por las bajas temperaturas.
- Falta de legislación que impide la extensión del uso, junto a la calidad de la propia ceniza, sobre todo por lo que hace referencia a la cantidad de carbón residual inquemado.

Uno de los principales inconvenientes es el coste del transporte debido a su baja densidad. En muchas ocasiones las grandes distancias del punto de generación al de reuso, invalidan estas posibilidades de valorización.

2.2.1.2. Recuperación de los metales contenidos en las cenizas volantes de centrales termoeléctricas con carbón

Debido al enorme potencial de recuperación que suponen las cenizas volantes de las centrales termoeléctricas de carbón en diversos países, se están desarrollando nuevas tecnologías para intentar la recuperación de los metales en ellas contenidos.

En los momentos actuales, las acerías están dispuestas a aceptar las cenizas, o el producto de ellas resultante, si la riqueza en óxidos de hierro supera el 85%. En el caso de las plantas de alúmina se exige un tenor en Al_2O_3 mayor del 45%.

Al margen de los sistemas de concentración, el método más asequible es el de la separación magnética. El sistema desarrollado en Rusia consiste en hacer pasar una solución de ceniza y agua a través de unos cilindros metálicos en el seno de un potente campo magnético. El sistema permite pasar del 5,6% en Fe_2O_3 que contienen dichas cenizas hasta un 61,0% en Fe_2O_3. De hecho si la muestra inicial contiene del 1 al 2% de magnetita y el 5% de hematites, la muestra hidrotratada consigue multiplicar por 5 la magnetita y casi por 10 el contenido final de hematites,

El análisis elemental de la ceniza de partida es:

SiO_2	58,7%
Al_2O_3	30,4%
Fe_2O_3	5,6%
CaO	1,9%
TiO_2	1,0%

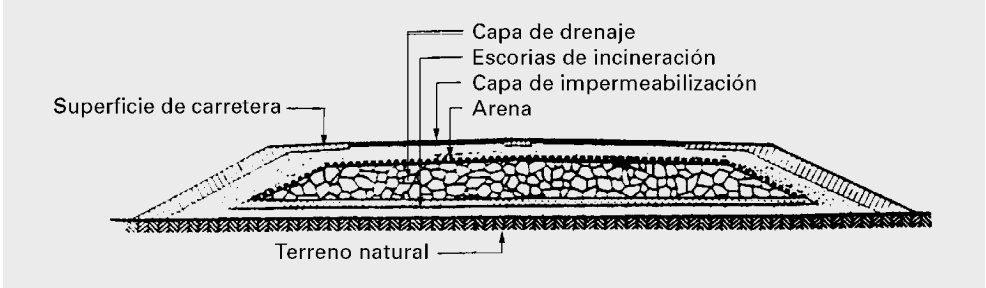


Figura 8.17. Construcción de una subbase con escorias.

Obviamente cuando el hierro se halla en forma de minerales no magnéticos, el procedimiento antes descrito no es válido y debe recurrirse a métodos químicos. El sistema se basa en que la alúmina y el sílice, bajo ciertas condiciones, se solubilizan quedando un precipitado alcalino de hierro y tierras raras. Los primeros ensayos han permitido lograr una alta concentración en Fe_2O_3. Así el resultado de este tratamiento, para dos etapas de concentración, es:

SiO_2	13,7%
Al_2O_3	8,5%
Fe_2O_3 +FeO	67,7%
CaO	3,1%
TiO_2	0,8%

De hecho los concentrados obtenidos a partir del tratamiento magnético de las cenizas volantes, pueden ya emplearse en acerías por cuanto su contenido en óxidos de hierro oscila del 40 al 50%.

El profundizar en estos procedimientos, en particular el químico, promete una rentabilidad interesante ya que, además del hierro, permite obtener otros subproductos como la alúmina (materia prima para la producción de aluminio, si bien por ella misma tiene un sinfín de aplicaciones como: refractarios, abrasivos, soportes para catalizadores, etc.) y el sílice. Además se puede vender todo ello en forma de una masa de naturaleza vítrea.

2.2.1.3. Áridos sinterizados a partir de cenizas volantes

A partir de la propiedad que presentan las cenizas volantes de poder ser aglomeradas en húmedo con cierta facilidad, se ha desarrollado un proceso en el cual se introducen en granuladoras/compactadoras para conferir a la pasta preparada una geometría próxima a la esférica.

Seguidamente, los pelets se destinan al proceso de sinterización. Las partículas de cenizas volantes son muy estables, pero al calentarlas por encima de 1.000 ℃ se inician una serie de reacciones en estado sólido que proporciona una extremada rigidez al conjunto. Durante el proceso las partículas más activas sufren una reducción de su área individual por cuanto se han adherido a las adyacentes, por lo que la velocidad de sinterización se reduce. Si se prolonga el proceso, o bien se aumenta la temperatura de trabajo se inicia una fusión que desmorona la geometría del conjunto.

Las cenizas volantes contienen entre un 2 y un 12% de carbón, como elemento contaminante procedente de la defectuosa combustión del combustible original. Una cantidad próxima al 4% en carbón favorece la sinterización y aporta energía al proceso. Una cantidad superior puede entorpecer la sinterización.

La Figura 8.18 muestra el esquema sinóptico de una planta de producir árido sinterizado a partir de cenizas volantes.

2.2.2. Ladrillos a partir de cenizas volantes

Aprovechando la posibilidad de poder sinterizar las cenizas volantes y siguiendo las mismas pautas que en el caso del árido sinterizado, se fabrican ladrillos.

El ladrillo, al poseer una geometría concreta, necesita de un sistema de fabricación por sinterización

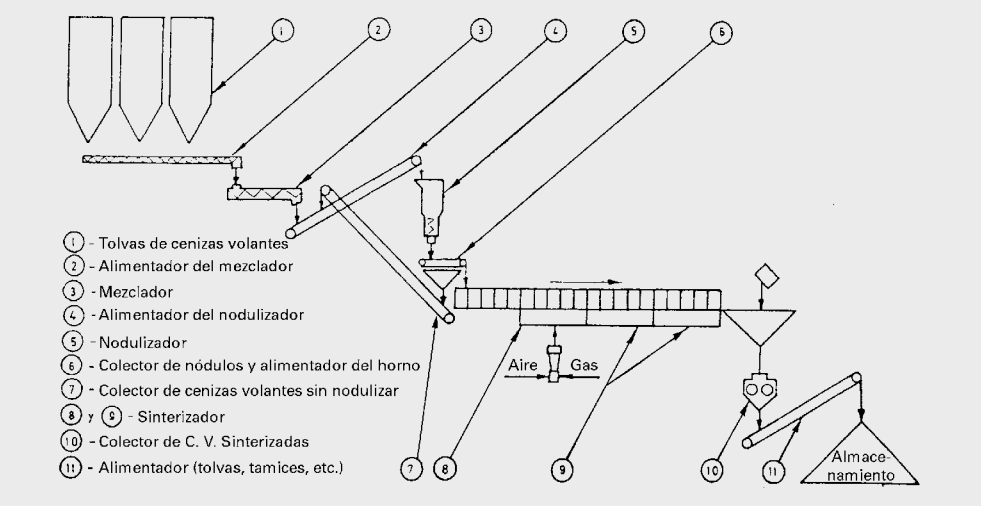


Figura 8.18. Producción de árido sinterizado a partir de ceniza volante.

sustancialmente diferente al proceso cerámico convencional. La sinterización es un proceso en el cual las reacciones tienen lugar, mayoritariamente, en fase sólida y la presencia de fase vítrea es, en la práctica, despreciable. Mientras que el proceso de ceramización se caracteriza por la formación de una abundante fase vítrea que actúa de promotora y dinamizadora del proceso.

Un factor claramente favorable a la sinterización, con respecto al cerámico, es que su gasto energético es muy inferior. La materia prima, en el caso de las cenizas volantes, no es preciso triturarla y durante la fase de sinterización su contenido en carbón aporta una energía importante.

Sin embargo la pasta no es nada plástica y para su moldeo es preciso añadirle silicato sódico. La conformación se lleva a cabo en una prensa hidráulica. El ladrillo se encaña en vagonetas para su fase de sinterización en el horno túnel.

La Figura 8.19 representa el principio de funcionamiento de una planta de fabricación de ladrillos siguiendo esta técnica.

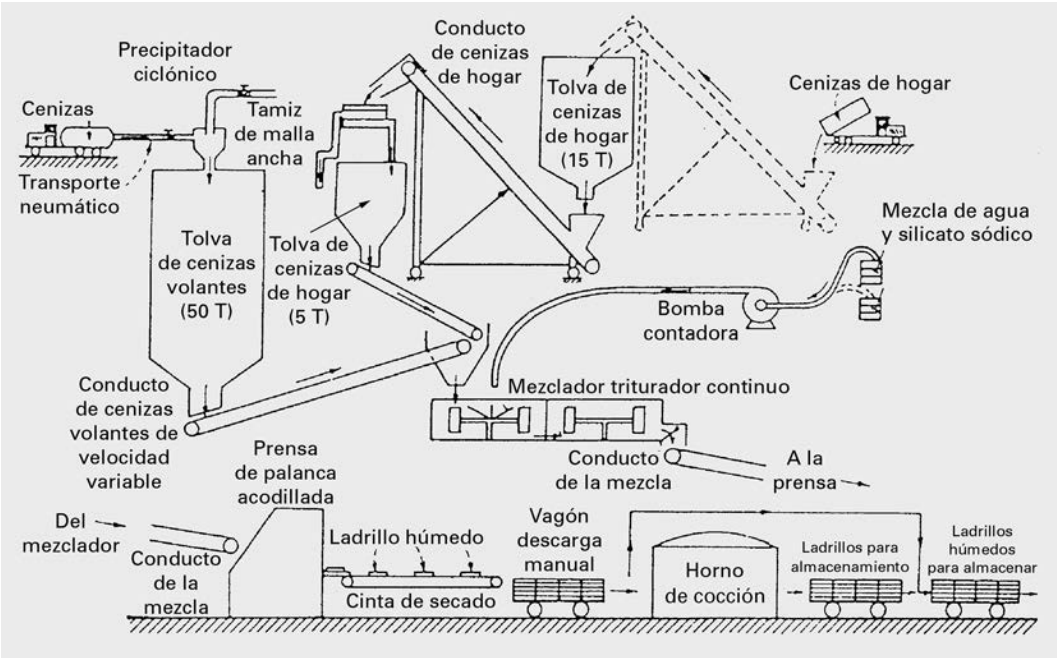


Figura 8.19. Fabricación de ladrillos a partir de cenizas volantes.

3. Valorización de los residuos procedentes de la industria siderúrgica y metalúrgica

La industria siderúrgica ubicada en el norte del país (País Vasco) produce el 70% de acero de horno eléctrico de España y el 10% de la UE, lo que le convierte en el tercer productor de la Unión Europea, con un alto nivel de exportación. Utiliza tecnologías avanzadas en todos sus procesos y ha incorporado sistemas de gestión medioambiental en todas sus plantas como instrumento para lograr un desarrollo sostenible del sector. La mayor parte de la producción es acero común y el resto, como indica la Tabla 8.14, acero inoxidable.

El acero es un material que puede ser reciclable indefinidamente al cien por cien sin perder sus cualidades por lo que puede considerarse como un elemento altamente sostenible. Debido a que presenta propiedades magnéticas que no se encuentran en ningún otro material, resulta muy fácil separar el acero de

Tabla 8.14. Producción por tipo de acero en el País Vasco (1997)

Tipo de acero	Producción (t/año)	% Producción
Acero común	3.640.000	70,0%
Acero especial	1.476.000	28,4%
Acero inoxidable	83.200	1,6%
TOTAL	5.200.000	100,0%

otros residuos y desechos domésticos. Además, la recogida selectiva de chatarra permite su óptima incorporación a los procesos de fabricación. Esta ventaja lo convierte en el material más reciclado del mundo.

Todos los subproductos resultantes del proceso de fabricación del acero se pueden reutilizar, así como la escoria generada durante la producción de arrabio y acero se emplea como material mineral de alto valor para la construcción de carreteras, como lastre o en la fabricación de cemento. La transformación de esta escoria de horno alto en cemento, sin necesidad de ningún tratamiento adicional, evita la extracción cada año de 4,5 millones de toneladas de caliza, ahorra 350.000 toneladas de carbón y reduce las emisiones de CO_2 a la atmósfera en algo más de 2 millones de toneladas/año.

En la década de los años 60 del pasado siglo la producción de acero consumía casi un 50% más de energía que en la actualidad, una energía que procede del carbón o de la electricidad, lo que demuestra la eficiencia alcanzada con los nuevos procesos productivos; en el mismo periodo, las emisiones de CO2 se han reducido a la mitad y el vertido de material particulado se ha recortado en más de un 90%, reciclándose tras ser retenido por las instalaciones de filtros. La mejora continua del proceso de fabricación también ha incluido una disminución en el consumo de agua, que desde 1960 se ha reducido a la mitad. A la vez, se reutilizan los gases residuales para producir energía. Casi la mitad del acero producido en el mundo en la actualidad se fabrica en acerías eléctricas que trabajan exclusivamente con chatarra reciclada como materia prima y en consecuencia, la generación de CO_2 se ha reducido de forma importante.

Se puede establecer dos grandes apartados en la gestión de los residuos relacionados con la industria metalúrgica:

- Los residuos derivados de la siderurgia integral y las transformaciones metalúrgicas.
- Los residuos procedentes del abandono o envejecimiento de los bienes que contienen gran cantidad de metal, como los automóviles o las neveras, comúnmente denominadas chatarras.

3.1. NATURALEZA DE LOS RESIDUOS DE LA SIDERURGIA INTEGRAL

La Tabla 8.15 y la Tabla 8.16 engloban todo tipo de residuo que se genera en las fábricas que parten de mineral para la obtención de acero, teniendo inte-

Tabla 8.15. Clasificación de los residuos siderúrgicos por proceso

Residuos siderúrgicos	
Baterías de coquización	Gases Líquidos y sólidos
Planta de sinterización	Polvos
Planta de peletización	Rechazos Polvos
Horno alto	Gases Polvos Lodos Escorias Refractarios
Acería	Lodos y polvos Aceites Escorias Refractarios
Laminación en caliente y forja	Gases y nieblas Despuntes Escarpa Cascarilla
Laminación en frío	Cascarilla Decapados
Recubrimiento	Decapados y aceites Estañados Galvanizados y electrocincados Otros recubrimietos
Acabado	Descortezado Rectificados Rectificado de precisión
Tubulares	Cascarilla Decapados
Moldeo	Arenas comunes Resinas Cerámicas

Tabla 8.16. Clasificación de los residuos siderúrgicos según su estado

Residuos siderúrgicos		
Sólidos	Minerales	Lodos, polvos y escorias de HA Lodos, polvos y escorias de acerías Polvos de la planta de sinterizado Polvos de los electrofiltros y captadores Rechazos de las baterías de coquización Refractarios
	Metálicos	Escarpa, cascarilla, viruta
	Químicos	Sulfato ferroso, sulfato amónico, oxido férricos
Líquidos	Grasas, aceites, ácidos, cianuros, etc.	
Gaseosos	Gas de HA (gas pobre), gas de convertidor, gas de coquización	

gradas todas las operaciones en su zona de influencia industrial.

Por otra parte, la Tabla 8.17 hace referencia a la caracterización de las principales escorias que se generan en la industria siderúrgica.

Tabla 8.17. Composición base de las escorias negras y escorias blancas

Escoria negra (%)	Escoria blanca (%)
CaO : 27-37	Calcio : 34,5
SiO : 11-25	Silicio : 11,7
FeO : 3-25	Hierro : 3,2
Fe_2O_3 : 2-22	Magnesio : 8,1
MgO : 4-11	Aluminio : 2,7
Cr_2O3 : 0,6-4	

El proceso de afino del acero se lleva a cabo en dos etapas. La primera en el propio horno y la segunda en un horno cuchara.

En el primer afino se analiza la composición del baño fundido y se procede a la eliminación de impurezas y elementos indeseables (silicio, manganeso, fósforo, etc.). A la vez se lleva a cabo un primer ajuste de la composición química por medio de la adición de ferroaleaciones que contienen los elementos necesarios (cromo, níquel, molibdeno, vanadio, titanio, etc.).

El acero obtenido se vacía en una cuchara de colada (cuba), revestida de material refractario, que hace la función de un segundo horno de afino en el que termina de ajustarse la composición del acero y de dársele la temperatura adecuada para la siguiente fase en el proceso de fabricación.

Durante el proceso de fusión y afino del acero se forman residuos que se pueden resumir en tres:

- Fase líquida: formada por el líquido fundido.
- Fase sólida: formada por la escoria (negra procedente de fusión y blanca procedente del afino).
- Fase gaseosa: formada por los gases de fusión y partículas finas (polvo de acería). Al margen de las connotaciones ambientales los gases suelen evacuarse a elevada temperatura lo que abre grandes posibilidades a instalar recuperadores de calor e incluso equipos de cogeneración.

En definitiva, los residuos generados en el proceso productivo son:

- Gases: generados como consecuencia de los procesos de fusión y afino. Los gases son depurados normalmente por vía seca para retener las partículas arrastradas y posteriormente son emitidos a la atmósfera y los polvos de acería son almacenados para su posterior gestión.
- Sólidos: Se pueden distinguir las escorias, los refractarios (procedente de la rotura del refractario o de la reparación y reconstrucción del horno) y los electrodos como consecuencia de la degradación o rotura de los mismos.

En resumen, la fabricación de acero genera una serie de residuos procedentes del proceso de la depuración de gases como son las escorias negras y blancas, los polvos de acería y los refractarios, tal como sintetiza la Tabla 8.18.

3.2. GENERACIÓN Y PROPIEDADES DE LAS ESCORIAS DE ALTO HORNO

Las escorias son subproductos de la siderurgia y metalurgia. Su composición química y física depende del mineral usado y de la tecnología empleada. Así las escorias procedentes de alto horno tienen propiedades hidráulicas, mientras que las escorias LD (Linz-Donawitz) no.

El alto horno es virtualmente una planta química que reduce continuamente el hierro del mineral desprendiendo el oxígeno del óxido de hierro existente para liberar el hierro. El horno está formado por un reactor cilíndrico de acero forrado con un material no

Tabla 8.18. Origen y clasificación de residuos en la producción de acero. (Comunidad Autónoma del País Vasco, 1997)

Tipo de residuo	Proceso de origen	Calificación de residuo	Generación relativa kg/t acero	Generación en CAPV (t/año)
Escoria negra	Fusión	Inerte	110-150	660,000
Escoria blanca	Afino	Inerte	20-30	175,000
Polvo de acería	Fusión	Peligroso	18-28	80,000
Refractario	Mantenimiento	Inerte	4-10	36,400
Electrodo	Explotación	Inerte	1,3-2	7,800

metálico y resistente al calor, como ladrillos refractarios y placas refrigerantes. El diámetro de la cápsula disminuye hacia arriba y hacia abajo, y es máximo en un punto situado aproximadamente a una cuarta parte de su altura total. La parte inferior del horno está dotada de varias aberturas tubulares llamadas toberas, por donde se fuerza el paso del aire. Cerca del fondo se encuentra un orificio por el que fluye el arrabio cuando se vacía el alto horno. Encima de ese orificio, pero debajo de las toberas, hay otro agujero para retirar la escoria. La parte superior del horno, cuya altura es de unos 30 m, contiene respiraderos para los gases de escape, y un par de tolvas redondas, cerradas por válvulas en forma de campana, por las que se introduce la carga en el horno. Los materiales se llevan hasta las tolvas en pequeñas vagonetas o cucharas que se suben por un elevador inclinado situado en el exterior del horno. La Figura 8.20 reproduce un esquema de un típico alto horno.

La formación de escoria se realiza para favorecer las reacciones químicas de los procesos de fusión y afino. El mayor volumen de escoria se genera durante el proceso de fusión donde se produce la fase oxidante del líquido fundido. La oxidación del hierro y otros metales presentes en la chatarra, utilizada como materia prima, producen óxidos que pasan a la escoria.

Las escorias procedentes del alto horno se han generado a 1.600 ℃, por lo que al ser líquidas su posterior estructura cristalina/amorfa dependerá de la forma de enfriamiento. Si este es rápido la estructura queda colapsada y es mayoritariamente amorfa y sus propiedades serán las de un material altamente reaccionable y, en función de su tamaño de grano y superficie especifica, poseerá propiedades puzolánicas notables. Si el enfriamiento es lento la estructura es esencialmente cristalina y su dureza es muy elevada, lo que permite su uso como árido de primera calidad.

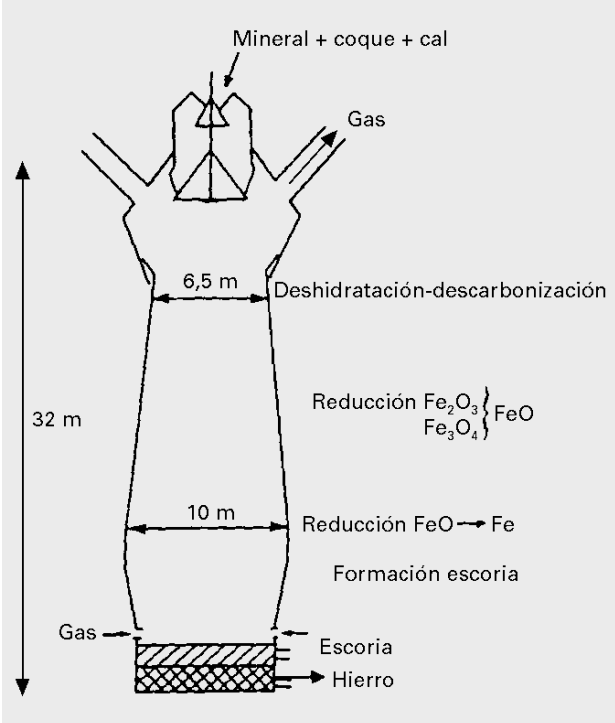


Figura 8.20. Esquema de un alto horno.

La fórmula química de las escorias admite diversas posiciones en el diagrama cuaternario SiO_2-Al_2O_3-CaO-MgO. La proporción relativa de estos valores determina, con independencia de su grado de cristalinidad, las propiedades hidráulicas, tal y como indica la Figura 8.21.

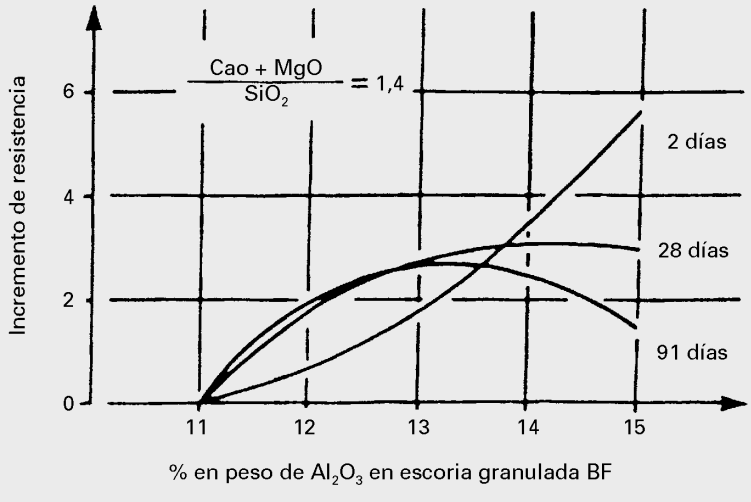


Figura 8.21. Propiedades hidráulicas de las escorias siderúrgicas.

3.2.1. Naturaleza y empleo de escorias

La fabricación de acero genera residuos industriales que representan entre un 15 al 20% de la producción total de acero, siendo las escorias negras el subproducto industrial más importante en la fabricación de aceros comunes, tal como muestra la Tabla 8.19. La chatarra de hierro es la principal materia prima en la fabricación de acero en horno eléctrico, en la que también se emplean en menor cantidad minerales de hierro, ferroaleaciones, elementos desoxidantes, etc.

Tabla 8.19. Cantidad generada de escorias negra y blanca según el tipo de acero

Acero	Escoria negra (kg/t acero)	Escoria blanca (kg/t acero)
Común	120-150	20-30
Especial	90-110	20

Las escorias negras son, por su naturaleza y composición química, muy diferentes a las escorias de alto horno que son muy conocidas como aditivos activos para la elaboración de cemento.

La existencia de grandes depósitos de escorias de acería de alto horno al aire libre las convierte en un problema a corto y largo plazo, tanto para las empresas como para el medio ambiente. Esto obliga a buscar alternativas de aprovechamiento para minimizar el impacto de su generación y acumulación. Una de las principales aplicaciones que se puede dar a estas escorias es como árido reciclado en la formulación de hormigones y bases y subbases en carreteras en mezclas bituminosas usadas en la capa de rodadura; teniendo en cuenta las buenas cualidades como menor riesgo de hinchamiento, excelente coeficiente de pulido y buena afinidad por los betunes.

Para la minimización y reciclaje de las escorias de acería existen alternativas operativas diferentes según éstas son negras o blancas.

Las escorias blancas tienen casi como una única alternativa de valorización su utilización en la industria cementera en sustitución de la marga, siendo ésta una alternativa que no presenta ningún tipo de impacto de carácter medioambiental.

Las escorias negras presentan tres alternativas de valorización cuya validez técnica, económica y medioambiental ha sido confirmada en los últimos años y a gran escala.

- La primera alternativa es la introducción en la industria cementera como aporte de hierro en el proceso de fabricación del clínquer siendo necesario un pretratamiento de cribado de la escoria para evitar problemas en las cintas transportadoras.
- La segunda posibilidad es emplear las escorias en capa de rodadura, formando parte del ligamento bituminoso de las capas asfálticas de las carreteras. Para este uso la escoria se debe someter al test de lixiviación y cumplir estrictamente los límites establecidos para cadmio y selenio; así mismo, la escoria debe cumplir el test de hinchamiento cuyo resultado no debe ser superior al 0,5%.
- La tercera alternativa de reciclaje es la utilización de las escorias como explanada, bases y subbases de carretera. Para esto se debe prestar especial atención a los resultados de análisis de contenidos de metales pesados como bario, cadmio, cromo, molibdeno, níquel, plomo, selenio, vanadio y zinc, así como también sulfatos y fluoruros. El hinchamiento no debe superar el 0,5% y debe asegurarse una granulometría fija por un pretratamiento de cribado.
- Otra vía de valorización consiste en el empleo de escoria de alto horno, una vez molida, como materia prima para la fabricación de materiales cerámicos, en particular pastas de gres en monococción. Según la naturaleza de la arcilla empleada puede llegar a usarse un 50% en peso de escoria. Otra opción, también cerámica consiste en mezclar escorias finamente molidas a las que se les añade colas (grasa animales) y sales alcalinas. Todo ello se granula y el pelet se cuece obteniendo un agregado ligero con densidades aparentes del orden de 400 kg/m^3.
- Finalmente, otra aplicación es el empleo de la escoria como elemento abrasivo, en sustitución de la arena o el corindón, para la limpieza de cascos de buques.

El análisis de alternativas de reciclaje a escala global de la Comunidad Autónoma del País Vasco confirma que las diferentes vías de reciclaje son capaces de absorber casi el 100% del total de escorias de acería generadas por la industria.

Los pavimentos actuales convencionales presentan inconvenientes como elevado ruido, formación de balsas de agua en caso de lluvia y alto grado de absorción del calor; por lo tanto, el futuro de los pavi-

mentos pasará por ser materiales elaborados con hormigones porosos y las escorias de acería constituirán una alternativa ventajosa en aspectos económicos, sociales y ambientales.

En su composición, las escorias negras contienen compuestos nocivos tales como: cal libre, magnesia libre, sulfuros, altos contenidos de óxidos de hierro y óxido de manganeso. Estos compuestos en presencia de agua y/o por reacción con los compuestos del cemento pueden experimentar un considerable aumento de volumen que derivaría en la pérdida de las prestaciones y la posible desintegración de las capas u hormigones elaborados con estos subproductos industriales. Sin embargo, estudios recientes demuestran que la cantidad de estos compuestos nocivos presentes en las escorias se encuentran en concentraciones despreciables por lo que no deberían causar ningún problema de inestabilidad cuando se utilicen como áridos de reciclado.

La escoria enfriada al aire tiene estructura cristalina y una superficie específica elevada con una densidad que oscila de 1.120 a 1.360 kg/m^3 y una capacidad de absorción de agua del 1 al 6%.

La escoria expandida es más porosa que la anterior y más ligera. Con una densidad de 800 a 1.000 kg/m^3.

El difractograma de la Figura 8.22 indica las principales fases cristalinas de las escorias.

3.2.1.1. Usos en explanadas, bases y sub-bases de carreteras

Como es habitual para la valorización de un residuo hay que contemplar el problema bajo dos puntos de vista diferentes pero complementarios:

Aspectos medioambientales:

- Para el uso de las escorias que estarán en contacto con el suelo el criterio general es que deban presentar un cambio en la composición de las mismas inferior al 1% en un periodo de tiempo de 100 años suponiendo esto un riesgo aceptable para el medio ambiente.

Aspectos técnicos:

- Los áridos que deben emplearse en las capas base de una carretera deben cumplir las especificaciones del PG3-75, pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras, Carreteras y Puentes, en las que se exige una elevada resistencia mecánica a la disgregación.
- Se buscan áridos muy limpios, sin minerales arcillosos, equivalentes de arena superior a 30% y sin plasticidad, con un elevado número de caras de fractura y con una dureza elevada que evite roturas de las aristas (Coeficiente de Los Ángeles menor de 35).
- Debido a la dureza de estas escorias se pueden considerar como un material apto para crear esqueletos minerales resistentes con una elevada capacidad portante para transmitir las cargas de tráfico a las capas inferiores sin deformarse y tras un tratamiento adecuado llegan a cumplir con creces todas las especificaciones que exigen los pliegos de carreteras; sin embargo, permanece latente el riesgo de expansión e hinchamiento que puede existir.

Fase mineralógica	Asignación
Akermanita	1, 2, 3
Gehlenita	10, 11, 12
Akermanita / Gehlenita	6, 7, 8, 9, 14, 15
CaO. MgO. Al_2O_3. SiO_2	9
2CaO. MgO. $4Al_2O_3$. SiO_2	13

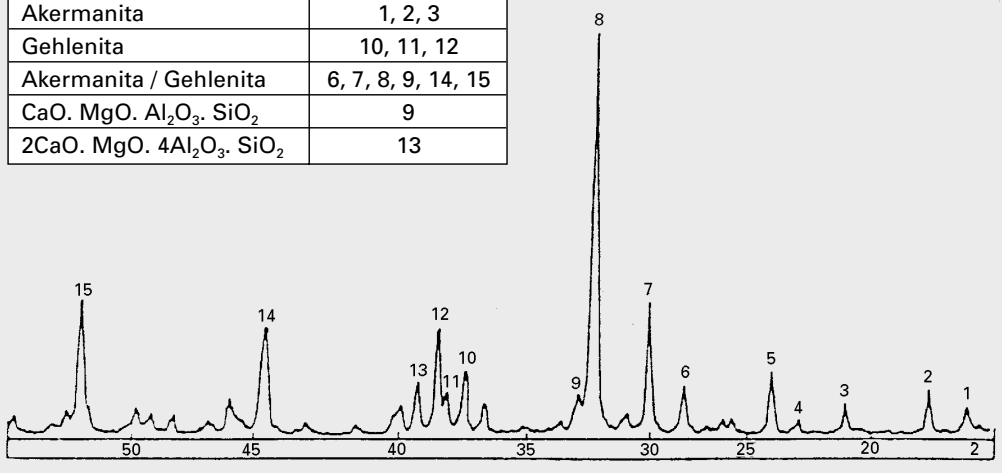


Figura 8.22. Fases cristalinas de las escorias.

3.2.1.2. Uso en capas de rodadura

Aspectos ambientales:

- Resulta muy difícil elaborar una mezcla en la que el árido utilizado sea 100% escoria debido a la falta de finos procedentes del tratamiento de las mismas.
- El betún tiene carácter impermeabilizante por lo que limita el contacto entre el agua y el árido en las zonas en las que el ligante no envuelve al árido.
- El tráfico rodado origina el desgaste del betún en la zona superficial de la capa de rodadura, provocando que el árido salga a la superficie permitiendo su contacto por la acción del agua de lluvia.

Aspectos técnicos:

- El riesgo de hinchamiento se ve disminuido por el hecho que la escoria está rodeada de betún que la impermeabiliza.
- Las propiedades físicas de la escoria las hacen muy aptas para su uso en mezclas bituminosas, tienen un buen coeficiente de Los Ángeles y un excelente coeficiente de pulido acelerado que garantiza que como árido no será fácilmente pulimentable, ofreciendo microtexturas rugosas que favorecerán la adherencia con los neumáticos en las capas de rodadura.

3.2.1.3. Utilización de escorias negras en cementera

Aspectos medioambientales:

- Al emplear escorias en la fabricación de cemento el residuo sufre una transformación térmica al estar sometido a temperaturas de más de 1.300 ℃ produciéndose la sublimación y emisión por chimenea de óxidos metálicos (plomo, zinc, cadmio y buena parte del níquel), por lo que se debe realizar el control medioambiental de las escorias determinando la cantidad de metales presentes en las partículas en suspensión tanto de las emitidas por chimenea como en el clínquer formado.

Aspectos técnicos:

- Según la composición química y una dosificación adecuada del material, que permitan obtener un producto similar al que se tiene al emplear materia prima convencional, se ha demostrado que es posible utilizar escorias con una dosificación del 4% sin que se aprecien problemas de calidad técnica en el producto final.

3.2.1.4. Utilización de escorias blancas en cementera

Aspectos medioambientales:

Los parámetros y características de las escorias blancas que pueden influir en el proceso de fabricación del cemento comprenden:

- Altos contenidos en sulfatos y sulfuros que pueden ocasionar problemas importantes debido a la formación de pegaduras; también se incrementan las emisiones de SO_2 (limitado a 1.000 mg/Nm^3). En el caso de las escorias blancas el nivel de sulfatos es bajo por lo que sustituir la marga por escoria blanca no implica incremento en las emisiones ni problemas con pegaduras.
- Si tienen un contenido superior al 2% en magnesio puede ocasionarse inestabilidad de volumen. Es por esto que es el magnesio el factor limitante que determina la máxima dosificación que por lo general no debe ser mayor al 5%.

Aspectos técnicos:

- La utilización de escoria blanca es posible sin perjudicar la calidad de clínquer obtenido en lo que a composición química se refiere.
- La resistencia del cemento obtenido no se ve afectada por la utilización de escorias blancas.

3.2.2. Preparación y propiedades de los cementos de escorias

El cemento de escoria de alto horno está elaborado con clínquer de Pórtland, escoria de altos hornos granulada y cal hidratada; está diseñado para obras donde se requiera una alta resistencia a agresiones químicas empleándose además en las construcciones de hormigón en general. El porcentaje mínimo de escoria es de 60% en peso.

Debido a las propiedades puzolánicas que exhiben las escorias siderúrgicas, en particular las de estructura amorfa, es posible formular cementos de escorias cuyas familias tienen una composición media en porcentaje en peso de escoria de:

- Cementos de escorias.
  Escorias siderúrgicas: 60-70%.
- Mezclas de Portland.
  Escorias siderúrgicas: < 35%.

Todas ellas se pueden preparar a partir del esquema básico representado en la Figura 8.23, donde los principales componentes son:

- Escoria de alto horno granulada (amorfa).
- Clínquer (Portland).
- Yeso.

Desde el punto de vista del ahorro energético los cementos de escoria tienen un buen futuro. Una tonelada de cemento Portland precisa 1,5 t de materia prima y 850 kcal/kg para su procesamiento, mientras que 1 t de cemento de escoria, conteniendo un 65% de escoria y con un 15% de humedad, necesita tan sólo 0,5 de materia prima y 400 kcal/kg.

A los 28 días la resistencia de los cementos de escorias suele ser la misma que el portland. Con el tiempo la resistencia mecánica de los cementos de escoria es habitualmente mayor. Ello se debe, como sucede con las cenizas volantes, a que parte de la escoria se hidroliza y libera SiO_2 y Al_2O_3 reactivos que atacan al CaO libre del portland y generan fases cristalinas muy fuertes y resistentes.

Otra propiedad digna de destacar es el incremento de resistencia a la agresión de los agentes químicos que presentan los hormigones de escorias, por ejemplo frente a sulfatos, aguas residuales, aguas calientes, aguas salinas, etc.

A partir de escorias de alto horno, y aprovechando su puzolanidad se fabrican toda una serie de cementos normalizados. La Tabla 8.20 reproduce las principales características de uno de estos cementos.

3.2.3. Propiedades de los hormigones de escorias

La fabricación de hormigones a partir de cemento de escorias conduce a un material con unas propiedades semejantes a las del propio cemento de escorias. En principio éste es menos activo que el cemento portland, por esto la resistencia mecánica a corto plazo es siempre menor en los hormigones fabricados con cementos de escoria.

En la Figura 8.24 la curva A representa la evolución de la resistencia mecánica de un hormigón estándar de cemento portland, mientras que las curvas B y C simbolizan la resistencia mecánica de hormigones con diferentes proporciones de cementos de escorias. En cualquier caso se observa que la resistencia mecánica de los hormigones de escoria, al cabo de un año, siempre son mayores que los de ce-

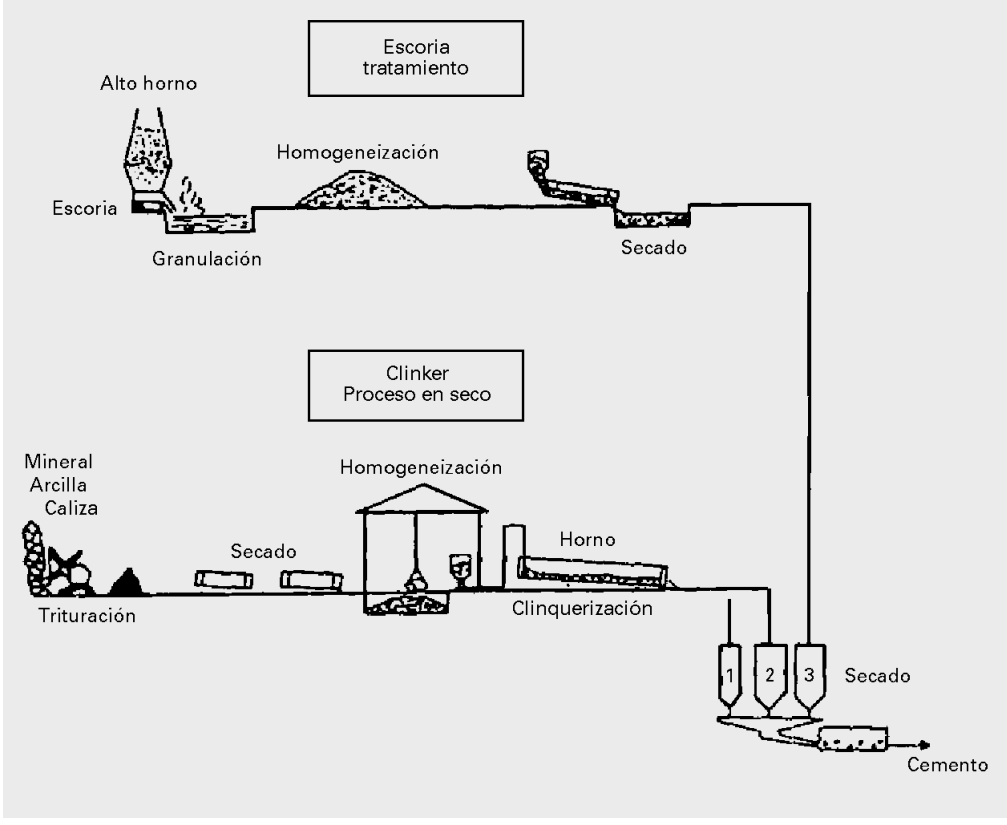


Figura 8.23. Preparación de cemento de escorias.

Tabla 8.20. Tipos de cementos siderúrgicos

CEMENTOS SIDERÚRGICOS I **CEMENTO S-1.350**	
ESPECIFICACIONES QUÍMICAS Componentes Clinquer portland ..... ≥ 70% Regulador de fraguado..... < 1% Escoria siderúrgica..... ≤ 30% y >20% Composición Escoria siderúrgica: (Ca0% + Mg0% + Al_20_3%)/$Si0_2$%: > 1 Cemento: Pérdida al fuego..... % máx. 4 Residuo insoluble..... % máx. 3 Trióxido de azufre SO_3 ..... % máx. 4,5 ESPECIFICACIONES FÍSlCAS Finura de molido Residuo máx. % sobre tamiz de 4.900 mallas/cm^2: 15. Tiempo de fraguado Principio después de minutos: 45. Final antes de horas: 12. Expansión en agujas (mm) Máxima en frío y en caliente: 10. ESPECIFICACIONES MECÁNlCAS Resistencias mínimas (kp/cm2) (mortero normalizado) A flexotracción: A 1 día..... — A 2 días ..... — A 3 días ..... 40* A 7 días ..... 50 A 28 días ..... 60 A compresión: A 1 día..... — A 2 días ..... — A 3 días ..... 175* A 7 días ..... 250 A 28 días 350	UTILIZABLE para: Obras de hormigón en masa o armado, incluso de gran volumen, que requieran un calor de hidratación moderado. Obras de hormigón en masa o armado, en ambientes ligeramente agresívos por salinidad en general (zonas litorales) o por sulfatos, incluido el yeso**. Obras marítimas. Tratamientos higrotérmicos en prefabricación. Pavimentaciones. En todos los casos anteriores, siempre que no importen los posibles cambios de tonalidad del hormigón. Estabilización de suelos. CONTRAINDICADO para: Hormigón pretensado con alambres delgados, poco recubrimiento, o en ambientes agresivos salinos. Hormigón en ambientes muy secos. Hormigonado a bajas temperaturas, inferiores a + 2 °C. Medios medianamente y fuertemente agresivos. PRECAUCIONES Las normales en el almacenamiento. Dosificar en peso. No emplear dosificaciones bajas. Curar adecuada y prolongadamente, en especial en climas fríos o a temperaturas bajas, evitando en todo caso la desecación. Evitar el empleo de cemento de fabricación muy reciente.

* Valores indicativos, No es motivo de rechazo el no alcanzarlos.
** Sobre todo si el clinquer cumple las condiciones del P-Y.

mento portland. Ello es un acicate que debería valorarse, al margen de otras propiedades, a la hora de proyectar grandes obras como canales, presas, puertos, plataformas petrolíferas, reactores para centrales nucleares, etc.

Otro factor que afecta a la resistencia es la temperatura. Debido a la baja reactividad de los cementos de escoria, respecto al cemento portland, la temperatura activa la propiedad puzolánica (no obstante, ello puede suponer un inconveniente para ciertas aplicaciones de estos tipos de hormigones).

La durabilidad y la resistencia frente a la agresión de medios corrosivos (aguas ligeramente ácidas, rango de 4,0 <pH <5,5) de estos hormigones es mayor que los convencionales, debido a la composición química del cemento de escoria y, sobre todo, a la naturaleza de los compuestos formados a lo largo del tiempo. Esta propiedad es la que debería potenciarse para la aplicación de estos tipos de hormigones en sustitución de los hormigones tradicionales. La resistencia al hielo es bastante similar en ambos tipos de hormigón.

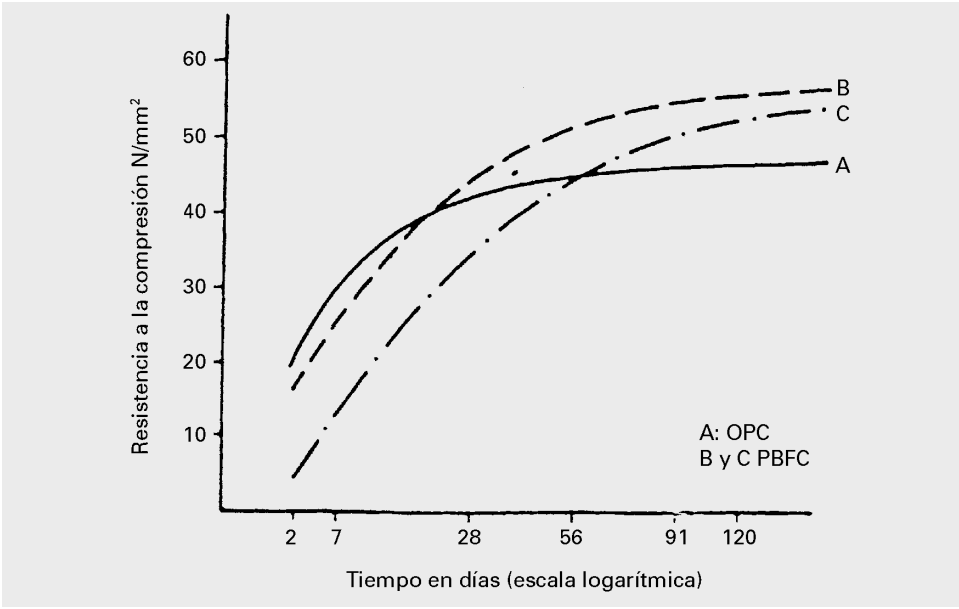


Figura 8.24. Resistencia mecánica de los hormigones de escoria.

Uno de los problemas para su mayor empleo es el factor transporte. En general este tipo de escorias, procedentes de alto horno, se generan en un único lugar de un país y el transporte puede representar una clara servitud para su utilización masiva. En este sentido hay que hacer notar que el peso específico de este tipo de cemento es elevado.

3.2.4. El uso de escorias como sustituto de grava

La sustitución de arena y/o grava de río por escoria para la fabricación de hormigón debe corregirse en formulación a base de compensar el aumento de porosidad con una cantidad adicional de cemento o bien el uso de otros aditivos, en especial para reducir la relación excesivamente alta agua/cemento y conseguir mayores espesores en ciertas aplicaciones, por ejemplo en bases de carreteras. El incremento de precio suele quedar compensado por el coste reducido del subproducto.

La posibilidad de usar escorias como áridos en la formulación de hormigones suele venir ligado al hecho de que estos hormigones a granel presentan una menor resistencia y la aplicación debe ser apropiada para cada caso.

Se han realizado numerosos ensayos para garantizar la calidad del hormigón teniendo presente que la caracterización de la escoria es variable de una partida a otra. En particular se ha analizado la influencia que puedan tener los componentes secundarios. Como por ejemplo, la formación de gases debido a la alcalinidad del medio (debido a la presencia de zinc metálico y aluminio), el efecto sobre el fraguado (debido a la presencia de compuestos orgánicos y sales de zinc), los sulfatos, el contenido de CaO y MgO libres y la calidad de cloro capaz de provocar corrosión.

Estos ensayos se llevaron a cabo sobre probetas de la siguiente composición:

- 340 kg/m^3 de cemento de escoria de alto horno.
- 75% en peso de escoria sobre el total de áridos.
- Tamaño de partícula de 0 a 16 mm.

Las investigaciones concluyeron en que el único problema detectado fue la baja resistencia mecánica del hormigón en los primeros días de aplicación, característica que, con la edad no sólo se corrige, sino que logra superar la resistencia de la probeta estándar del hormigón.

Las características estándar de composición de estos hormigones son:

- Cemento de escoria de alto horno (kg/m^3) 331
- Agua (total) (kg/m^3) 320
- Escoria seca (kg/m^3) 956
- Arena y grava secas (kg/m^3) 303

Con ello se consiguió una resistencia media de 245 kg/cm^2.

3.3. RECICLADO POR FUSIÓN DE ESCORIAS DE HORNOS ELÉCTRICOS

Las escorias metalúrgicas procedentes de los hornos eléctricos es uno de los residuos industriales más abundantes y con importantes posibilidades de valorización. Solo en Cataluña se generan más de 400.000 t/año y las aplicaciones que potencialmente tiene han posibilitado que se las denomine árido siderúrgico.

Se trata de una materia que sobrenada el líquido fundido (en el proceso de fabricación de acero a partir de chatarra por horno eléctrico) y se halla formado esencialmente por Fe, Si, Ca y Al. Más del 50% es fase amorfa y la fracción cristalina se halla formada por silicatos cálcicos, cálcico magnésicos, silicoaluminatos y óxidos de hierro. La cantidad total de MgO es inferior al 5% y la de cal libre inferior al 0,2%. Las demás propiedades más sobresalientes son:

- Densidad de las partículas: 3.600 kg/m^3.
- Densidad de transporte: de 2.000 a 2.200 kg/m^3.
- Coeficiente de pulido acelerado: 0,56.

Debido a su composición los valores de lixiviación son inapreciables, lo que abre infinitas posibilidades a su empleo como árido. Para este fin se tritura y se suministran, en Cataluña, cuatro fracciones granulométricas:

- Árido de 0 a 40 mm.
- Árido de 40 a 70 mm.
- Árido de 5 a 12 mm.
- Árido de 12 a 18 mm.

Las aplicaciones más sobresalientes son:

- Subbases de carreteras. Relleno de terrenos y restauración de espacios degradados.
- Capas de rodadura con mezclas bituminosas.
- Aplicaciones a granel (Contrapesos, rellenos de barreras, etc.).
- Áridos para formulación de hormigones, si bien teóricamente se podría sustituir hasta el 100%, los expertos no aconsejan sustituir más del 20%.

Aunque el costo de la fabricación de acero en el horno de arco eléctrico es generalmente más alto que el de los demás métodos de fabricación de acero, se obtiene una calidad de acero superior. Este tipo de horno suministra el mejor método para controlar la temperatura y las adiciones para las diversas aleaciones. Además su costo puede justificarse para la fabricación de acero en localidades donde no se cuenta con altos hornos ni con arrabios de primera fusión, o en lugares en donde las necesidades intermitentes de acero en cantidades pequeñas no justifiquen una instalación de grandes dimensiones y tiene la ventaja adicional de que no contamina la atmósfera como muchos otros. Aproximadamente un 40% de la producción mundial del acero se produce en este tipo de hornos.

La Figura 8.25 muestra un horno de fusión eléctrico equipado con electrodos de grafito, que trabaja a 1.600 ℃, y esta diseñado para la transformación de escorias de alto horno en lana mineral. Para el buen funcionamiento es indispensable un sofisticado aislamiento térmico del horno.

Para una escoria convencional y trabajando a 1.500 ℃, el consumo especifico para la obtención de fibra de escoria oscila de 500 a 550 kW · h/t, lo que equivale a 430-473 kcal/kg. Se trata de un consumo energético muy reducido, conseguido gracias a un calentamiento por efecto Joule aprovechando la buena conductividad eléctrica de las escorias (en caso de usar horno de arco el consumo específico puede, fácilmente, doblarse y, en el caso de usar un horno de

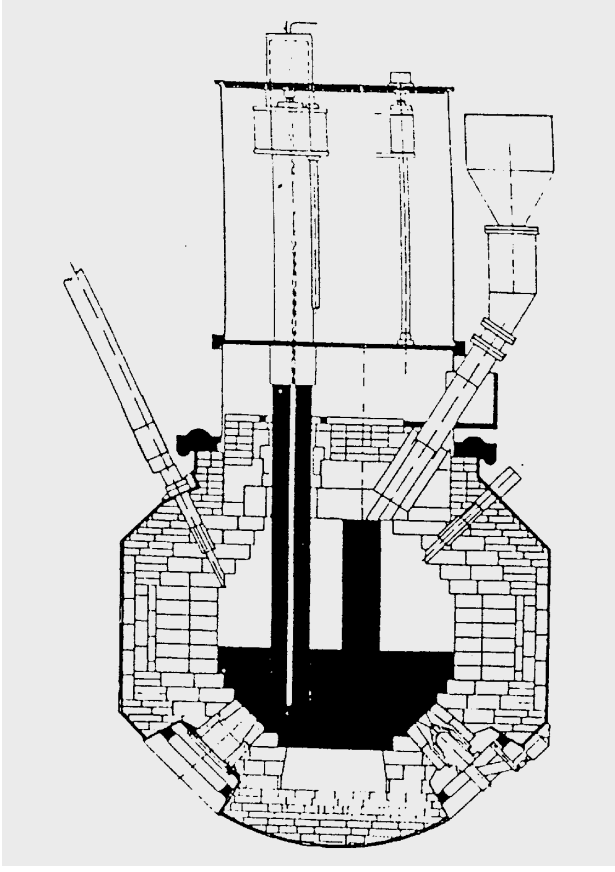


Figura 8.25. Horno de fusión eléctrico.

plasma el consumo puede llegar a triplicarse) que permite la aplicación industrial de la valorización de las escorias por fusión.

La misma tecnología, fusión en horno eléctrico, se puede aplicar para la valorización de:

- Vitrificación de cenizas volantes.
- Tratamiento de escorias de incineradoras.
- Destrucción de residuos de asbesto.

3.4. RESIDUOS EN LA FABRICACIÓN DEL ACERO INOXIDABLE

Los aceros inoxidables se fabrican en horno eléctrico y, por lo tanto, los residuos serán naturaleza semejante a los generados en la fabricación de los aceros comunes: escorias (que presentan la misma tipología y gama de aplicaciones que las escorias de aceros comunes) y polvos de acería cuya caracterización, como muestra la Tabla 8.21, es muy diferente.

El reciclado de polvos de acero inoxidable no es tan frecuente como el de acero común. En primer lugar por un problema de economía de escala: se fabrica mucho más acero común. En segundo lugar los óxidos de los metales que tienen aplicación directa como materias primas: PbO y ZnO son mucho menos abundantes. En general el grado de reciclado es muy bajo y la mayor parte va a la escombrera.

Tabla 8.21. Análisis químico (%) de distintos polvos primarios de acería eléctrica

Elemento	Alemania	Suecia	Reino Unido
Fe	27,1	22,4	29,8
Cr	11,6	9,7	11,0
NiO	4,2	5,8	3,2
MoO_3	—	2,5	1,1
Pb	0,63	2,4	1,0
Zn	4,5	4,4	5,6
CuO	0,2	0,3	0,5
CdO	0,1	—	0,07
CaO	2,1	21,6	7,8
MgO	2,6	1,8	2,9
MnO	4,	4,2	6,5
SiO_2	5,9	6,	7,8
Al_2O_3	0,4	0,6	0,5
K_2O	0,6	0,9	0,7
C	0,35	—	0,35
S	0,2	—	0,2

La Tabla 8.22 muestra el balance de los productos obtenidos por el reciclado de polvos de acería común, según el proceso Waelz.

Tabla 8.22. Balance de productos obtenidos en el proceso de Waelz

Ley (%)	Polvo de entrada 100%	Óxido Waelz 34%	Escoria 66%
Zn	22-24	54-56	0,2-0,4
Pb	4-5	9-11	0,1-0,2
Cd	0,03-0,1	0,1-0,2	—
Cu	0,2-0,4	0,03-0,04	0,3-0,5
Sn	0,2-0,3	0,2-0,4	0,1-0,2
As	0,04-0,08	0,01-0,02	0,05-0,1
S	1,8-2,2	1,4-1,8	1,5-2,5
F	0,2-0,4	0,4-0,8	0,1-0,2
Cl	1-1,5	2-4	0,03-0,05
C	1-2	0,2-0,8	5-10
FeO	26-30	3-4	34-38
MnO	4-5	0,6-0,8	5-6
CaO	6-7	0,4-0,5	8-9
MgO	2,5-3	0,01	3-4
BaO	0,01	0,1-0,15	0,1
Al_2O_3	0,4-0,6	0,5-0,7	2,5-3,5
SiO_2	3-3,5	2-2,5	35-37
Na_2O	1,5-1,9	2-2,5	1,2-1,6
K_2O	1,2-1,5	2-2,5	0,7-0,9
H_2O	9-11	—	5-15

3.5. RECUPERACIÓN DE Zn Y Pb. EL PROCESO WAELZ

El sistema Waelz consta de un horno rotativo en el que se introduce una mezcla de polvo de acería, principal residuo a tratar, y coque como combustible y elemento reductor para evitar la oxidación.

La escoria gruesa generada se enfría al agua y la fina se recircula y vuelve a introducirse en el horno junto con el combustible.

El material aprovechable (óxido de Waelz, muy rico en Pb y Zn) una vez libre de polvo entra en la torre de refrigeración y el precipitador electrostático donde se recupera el óxido de Waelz. Más tarde las fundiciones y las electrólisis transforman el óxido Waelz en zinc metálico.

Desde el punto de vista ambiental este proceso presenta el problema de generar una cantidad de re-

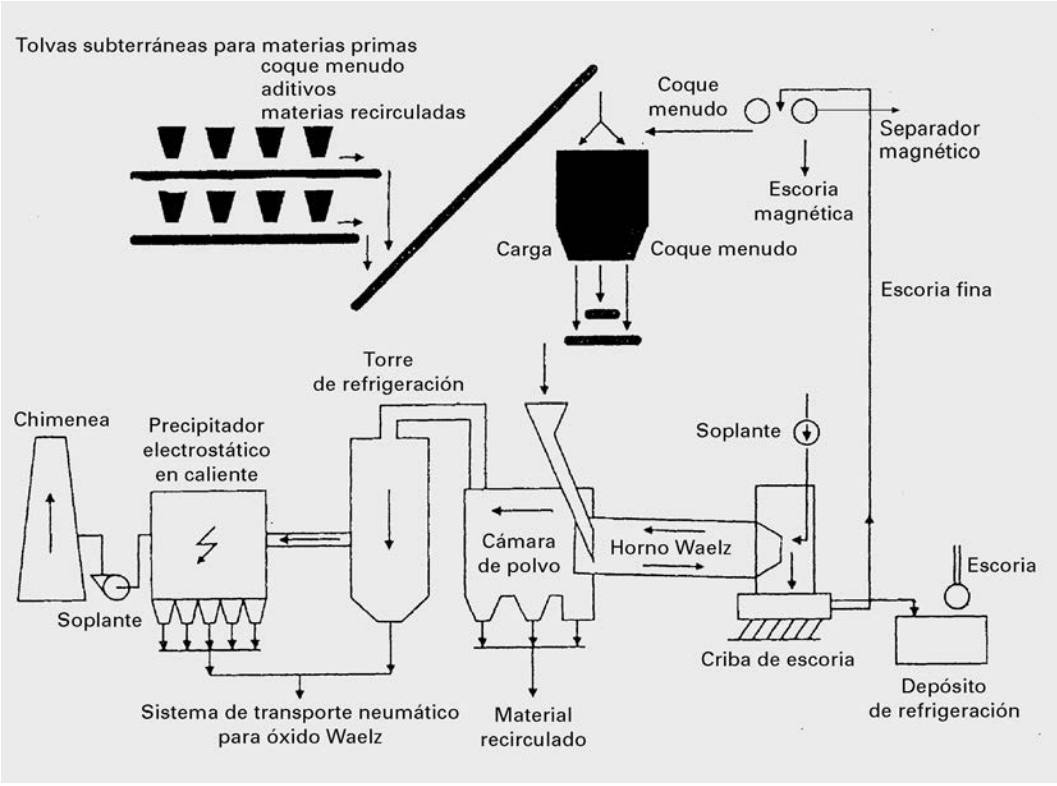


Figura 8.26. Proceso Waelz.

siduo prácticamente equivalente a la materia prima a tratar, por lo que constituye un firme candidato para aplicarle las denominadas tecnologías limpias.

Los únicos metales que en la actualidad son económicamente valorizables, son el Pb y el Zn. Por ello este tipo de instalaciones sólo pueden tratar residuos que contengan una concentración notable de dichos metales. En el Capítulo 14 de esta obra se amplia esta problemática.

3.6. VALORIZACIÓN DE LOS RESIDUOS DE LA INDUSTRIA DEL ALUMINIO

El aluminio es uno de los metales más importantes en la actualidad y uno de los que presentan una gama de aplicaciones más diversas, por lo que el consumo se incrementa cada año. Además goza de un buen «halo» ambiental lo que ayuda a consolidar su empleo. El consumo, a nivel de afectación del medio ambiente industrial y comercial, tiene dos focos bien diferenciados: los envases y las aplicaciones industriales. No obstante, desde la óptica de las actividades extractivas la minería del aluminio genera un fuerte impacto ambiental.

El aluminio se extrae de las bauxitas, minerales silicatados ricos en SiO_2, Al_2O_3 y otros óxidos menores; mineral de color rojo a causa de las impurezas que contiene de hierro. A partir de ellas se obtiene la alúmina y, más tarde, el aluminio. Todo ello, al igual que la siderurgia, se considera una gran industria.

En todo el proceso acaecen residuos que pueden ser contaminantes si no se tratan debidamente. Pero los factores más negativos de su producción son el gran aporte energético en forma de calor y corriente eléctrica que se necesita en los procesos de electrólisis y purificación y la elevada cantidad de emisiones gaseosas al aire.

En cambio, cuando se considera el aluminio reciclado, la energía utilizada en refundir una tonelada de aluminio es solamente el 6% (lo que representa un 94% de ahorro) respecto a la producción primaria a partir del mineral. En España, más del 50% del aluminio reciclado proviene de los productos de uso industrial o de la construcción, mientras que los envases de aluminio cuentan con una cuota de reciclado del 5%.

3.6.1. Generación de lodos rojos

Los lodos rojos son el residuo insoluble del proceso Bayer en el cual se extrae la alúmina de la bauxita por disolución en NaOH. Se caracterizan por contener óxidos de hierro, sílice y titanio, además de can-

tidades variables de compuestos de Si, Ca, Na, y otros elementos. Tienen porcentajes importantes de NaOH, que le dan un pH claramente básico, y al ser almacenados a la intemperie representan un riesgo medioambiental importante. En Galicia (norte de España) se producen más de 471.000 toneladas/año de este residuo.

El proceso Bayer es el empleado universalmente y comprende las siguientes fases principales:

- Lixiviación alcalina cuyo objetivo es la disolución de la alúmina con sosa, para no disolver hierro. Es en esta fase donde se obtiene el residuo más conflictivo: el lodo rojo.
- Precipitación del hidróxido de aluminio en agua.
- Calcinación progresiva del hidróxido de aluminio hasta 1.150 ℃.
- Electrólisis en presencia de carbón donde se obtiene el «aluminio Hall».
- Afino para eliminar las impurezas hasta obtener una pureza superior al 99,5% en Al.

Los lodos rojos, como ya se ha explicado en el Capítulo 6, presentan una morfología próxima a las arcillas y no es excesivamente difícil someterlas a un proceso cerámico, añadiéndole otras materias primas, y fabricar ladrillos de gran calidad.

4. La agricultura como gran industria y su impacto en el medio ambiente

Los residuos resultantes de la producción agrícola se pueden definir como la fracción o fracciones de un cultivo que no constituyen la cosecha propiamente dicha y a aquella parte de la cosecha que no cumple con los requisitos de calidad mínima para ser comercializada como tal. De forma similar, los restos de poda de los cultivos leñosos deben ser considerados asimismo residuos agrícolas estrictos.

Estos residuos vegetales presentan un contenido de humedad muy variable (según el cultivo del que provengan y la edad del mismo), fracción mineral variable en concentración total y equilibrio (según el órgano o fracción de que se trate) y relación carbono/nitrógeno generalmente alta, aunque con notables diferencias según la naturaleza y composición del residuo. La degradabilidad biológica de estos materiales dependerá del tipo de compuestos químicos mayoritarios en su estructura (azúcares solubles y de bajo peso molecular, hemicelulosa y celulosa) y de la presencia de componentes estructurales de lenta degradación (ceras, ligninas y otros polifenoles).

Los residuos de cosecha pueden presentar contaminación por fitosanitarios como resultado de la incidencia de plagas y enfermedades en el cultivo de procedencia (insectos, ácaros, nematodos, hongos, bacterias, virus, etc.), que deben ser tenidos en cuenta en el momento de considerar su posible tratamiento y posterior gestión. De igual manera se debe considerar la presencia de productos químicos persistentes provenientes del tratamiento fitosanitario que se haya realizado al cultivo durante el ciclo vegetativo, considerando que estos residuos pueden llegar a ser altamente problemáticos, especialmente en los cultivos sometidos a tratamientos intensivos en uso de agroquímicos.

En un contexto más amplio pueden considerarse también como residuos agrícolas los subproductos de origen vegetal generados por las industrias de transformación agrícolas y algunos residuos agrícolas específicos, como por ejemplo el compost que se emplea como sustrato en el cultivo del champiñón una vez utilizado.

Como se observa en la Tabla 8.23, las estadísticas de producción agrícola en el estado español en 1999 indican que el 44,51% de la superficie agrícola se destina a cereales, el 21,65% a oleaginosos, el 12,20% a fruta dulce y viñedo, el 8,11% a cultivos forrajeros y el 4,74% a frutos secos, sumando estos cinco grupos de cultivos el 91,21% de la tierra cultivada. La mayor importancia de los cereales es una característica común tanto a nivel mundial como de la Unión Europea. La segunda posición a nivel español y mundial está ocupada por las oleaginosas, mientras que en la Unión Europea este lugar los ostentan los cultivos forrajeros.

En el grupo de los cereales la cebada ocupa el 46,92%, siguiéndole en importancia el trigo (36,59%), seguidas por la avena (6,19%) y el maíz (6,00%). Estos cuatro cultivos totalizan el 95,7% de la superficie destinada a cereales. En la Unión Europea y a escala mundial el primer lugar es ocupado por el trigo.

Tabla 8.23. Distribución de la tierra cultivada (ha) por grupos de cultivos en el año 1999 (FAO, 2000)

Grupos de cultivos	Mundo		Unión Europea		España	
	Superficie (ha)	%	Superficie (ha)	%	Superficie (ha)	%
1. Cereales	678.249.922	48,61	36.749.752	47,06	6.620.715	44,51
2. Leguminosas grano	72.253.166	5,18	1.776.644	2,28	503.937	3,39
3. Oleaginosos	223.843.126	16,04	11.348.172	14,53	3.220.363	21,65
4. Raíces y tubérculos	51.831.556	3,71	1.416.470	1,81	137.400	0,92
5. Plantas azucareras	26.312.476	1,89	2.044.223	2,62	136.100	0,92
6. Plantas para fibra	36.517.677	2,62	628.710	0,81	110.100	0,74
7. Especias y otros	37.065.244	2,66	179.132	0,23	24.130	0,16
8. Cultivos forrajeros	174.856.626	12,53	15.237.815	19,51	1.206.650	8,11
9. Frutos secos	6.345.768	0,45	1.069.053	1,37	704.400	4,74
10. Fruta dulce y viñedo	47.258.628	3,39	5.551.962	7,11	1.814.985	12,20
11. Hortalizas	40.859.655	2,93	274	100,00	14.874.280	100,00

La mayor parte de la superficie destinada a oleaginosas corresponde a olivares (68,32%), ocupando la segunda posición el girasol (26,39%). Estos dos cultivos cubren el 94,71% de la superficie de oleaginosas. El olivo es el cultivo preeminente en la Unión Europea, en particular en España, mientras que a escala mundial se encuentra la soja.

La vid es el principal cultivo (64,08%) de la superficie ocupada por fruta dulce y viñedo, ocupando el segundo lugar, aunque a notable distancia, los cítricos (15,61%). Ambos cultivos totalizan el 79,69% de la superficie. En este grupo de cultivos el viñedo también ocupa la primera posición a escala europea y mundial.

Las praderas de pastoreo (26,52%) y las gramíneas forrajeras (26,52%) ocupan idéntica superficie en los cultivos forrajeros, quedando en tercer lugar la alfalfa (19,67%). Los tres cultivos anteriores suponen el 72,71% del total forrajero. Las praderas también son el principal cultivo de este grupo a escala mundial y europea.

El almendro (94,26%) ocupa una gran parte de la superficie destinada a frutos secos, siendo también el principal cultivo de este grupo en la Unión Europea, pero no a escala mundial.

Un plan de gestión de residuos orgánicos debe tener como objetivo convertir los residuos en recursos. Para ello se deben realizar acciones en tres ámbitos:

- Reducción del residuo en origen.
- Aplicación de tratamientos con el fin de conseguir un nivel de calidad acorde con el destino final; y
- Planificación y control del destino y uso del producto.

Estos planes de gestión deben establecerse, siempre que sea posible, con la finalidad de obtener un producto de calidad que pueda ser aplicado al suelo como enmienda o abono orgánico o que sea adecuado para la formulación de sustratos de cultivo (valorización agronómica). Cuando esta valorización no sea posible se planificará la viabilidad de su valorización energética (combustión/gasificación). Si ninguna de las anteriores alternativas resulta viable se procederá a programar su confinamiento final en vertederos controlados.

En el caso de los residuos agrícolas la valorización agronómica debe ser el objetivo prioritario, siempre y cuando se realicen los tratamientos necesarios (físicos y químicos de acondicionamiento) para garantizar la calidad del producto para una posterior programación de los planes de aplicación a suelos y cultivos.

La valorización agronómica de los residuos agrícolas responde a criterios ecológicos evidentes. En los ecosistemas naturales los residuos procedentes de la vegetación herbácea, arbustiva, trepadora y arbórea, así como los generados por la fauna, se depositan sobre el suelo iniciándose el ciclo de descomposición/humificación/mineralización del humus característico de la evolución de la materia orgánica en el suelo. El ciclo de la materia en los ecosistemas maduros tiende a ser cerrado y la tasa de actividad y metabolismo del suelo se establece en función de numerosos factores, entre los cuales destacan la plu-

Tabla 8.24. Distribución de la superficie (ha), producción (t) y del rendimiento (t/ha) de los principales cultivos en España en 1999 (FAO, 2000).

Cultivo	Superficie (ha)	Producción (t)	Rendimiento (t/ha)
Cereales	**6.620.715**	**17.982.870**	
Trigo	2.422.400	5.083.800	2,10
Arroz	112.100	845.100	7,54
Maíz	397.500	3.768.600	9,48
Cebada	3.106.600	7.434.300	2,39
Sorgo	9.400	47.000	5,00
Mijo	165	400	2,42
Avena	409.500	530.800	1,30
Centeno	122.200	219.700	1,80
Triticale	24.700	25.100	1,02
Otros cereales	6.620.715	17.982.870	
Oleaginosos	**3.220.360**	**4.466.786**	
Soja	4.200	9.200	2,19
Algodón	108.600	412.000	3,79
Colza	48.300	64.300	1,33
Girasol	849.900	579.300	0,68
Cacahuetes en cáscara	60	136	2,27
Olivo	2.200.000	3.394.700	1,54
Lino	9.100	6.000	0,66
Cártamo	200	250	1,25
Adormidera		900	
Fruta dulce y viña	**1.814.985**	**15.446.800**	**8,51**
Plátano	8.500	380.200	44,73
Manzano	50.000	922.200	18,44
Viña	1.163.000	5.420.700	4,66
Cítricos	283.350	5.820.900	20,54
Otros	1.814.985	15.446.800	
Cultivos forrajeros	**1.206.650**	**34.280.600**	
Maíz forrajero	84.000	3.945.200	46,97
Diversas gramíneas forrajeras	320.000	3.500.000	10,94
Alfalfa	237.400	12.213.900	51,45
Praderas policitas	320.000	9.700.000	30,31
Otros	1.206.650	34.280.600	
Frutos secos	**704.400**	**342.900**	
Almendro	664.000	279.100	0,42
Otros	704.400	342.900	

viometría, la temperatura, el contenido en oxígeno, la composición mineralógica del suelo y la naturaleza del humus formado.

En los sistemas de producción agrícola el ciclo de la materia se ve fuertemente alterado por las exportaciones realizadas por la biomasa de la cosecha, por lo que es necesario restituir al suelo los nutrientes minerales mediante técnicas de fertilización orgánica y/o mineral. Con el fin de minimizar la pérdida de fertilidad del suelo, la biomasa vegetal restante (residuos) debe ser devuelta directa o indirectamente al suelo, mediante la aplicación de aquellos tratamientos que faciliten su integración a la dinámica del suelo o sustrato. De esta forma la materia orgánica se pone a disposición de la microfauna del suelo y de la microflora de descomposición y de humificación que llevarán a cabo los procesos de mineralización primaria y formación de humus estable.

El sector agrícola afecta en mayor o menor cantidad a todas las sociedades. En las economías poco desarrolladas da empleo a la mayoría de la población y su impacto socioeconómico es alto pero, la generación de residuos es relativamente baja puesto que se valoriza la mayor parte de ellos. Por el contrario, en las sociedades muy desarrolladas emplean sólo el 3% de la población activa, priman la productividad y el uso de fertilizantes y productos fitosanitarios, produce graves alteraciones en el medio edáfico y, por extensión al medio ambiente. Con la ganadería, sector muy ligado a la agricultura, el panorama es muy paralelo.

El incesante incremento de la productividad en la agricultura ha conducido a situaciones un tanto contradictorias como:

- Reducción de la capacidad autodepuradora del suelo agrícola, lo que merma la capacidad del mismo para absorber una cantidad importante de residuos que tradicionalmente constituía un medio natural de aportación de nutrientes.
- Incremento del consumo de agua y energía.
- Mayor producción de todo tipo de residuos: sólidos, líquidos y gaseosos.
- Contaminación del suelo. El empleo masivo de fitosanitarios en el agua de riego conduce a la filtración y transferencia de los contaminantes.
- Mayor dependencia del exterior para el suministro de fertilizantes, productos químicos, fitosanitarios, semillas, piensos, etc.

4.1. AFECTACIÓN AL SUELO

Una parte de las actividades agrícolas, en la forma que hoy en día se llevan a cabo, conducen a una degradación más o menos intensa del suelo. La introducción masiva de sustancias ajenas al suelo altera el equilibrio que este mantiene con su entorno y acaba invalidándolo para el fin a que está destinado, esto es, servir de soporte para la producción de alimentos, hacer las funciones de filtro para el agua, de «reciclador» para los residuos biodegradables y hábitat para la flora y la fauna.

Se entiende por degradación del suelo la pérdida, total o parcial, de la capacidad reproductora como consecuencia de la contaminación, de la erosión, de la salinización, el agotamiento de nutrientes o la desertización.

La erosión es un fenómeno natural pero puede ser acelerado por una sobreexplotación, la eliminación de la capa vegetal y la desertización.

La forma más habitual de contaminación es el uso inadecuado de fertilizantes y productos fitosanitarios, que tiene consecuencias inmediatas en la ganadería. Este tipo de contaminación se denomina difusa puesto que el producto contaminante es añadido al agua y el resultado es muy difícil de controlar. También un mal uso de la fertilización afecta al suelo y puede ocasionar pérdidas en los niveles de materia orgánica y otros elementos nutrientes (por desplazamiento), acidificación, alteración de las propiedades físicas o contaminación por metales pesados. La adición de material nutriente en forma de fangos de EDAR, estiércol o la fracción fermentable de los RSU, no garantiza, en general un equilibrio entre la fracción nutriente, el nitrógeno y el fósforo que lo acompaña. Esto genera fuertes desequilibrios que deben ser cuidadosamente estudiados en cada caso. El vertido de purines de cerdo es un ejemplo límite ya que provoca exceso de N, P y metales pesados (Zn y Cu), pérdida de las características fisicoquímicas del suelo y salinización. Contamina el medio hídrico, eutrofización, con un aumento inaceptable de nitratos en los acuíferos. Incluso en el medio gaseoso puesto que las grandes cantidades de amoníaco emitidas llegan a producir nieblas y lluvia ácida, aparte claro está, de malos olores.

Posiblemente uno de los casos de contaminación más graves es el provocado por el abuso indiscriminado sustancias fitosanitarias. Se calcula que escasamente un 2% del fitosanitario va a parar al lugar que se pretende. El resto se pierde ya sea en el aire o en el agua y debido a su naturaleza tóxica afecta a toda una serie de organismos. En definitiva, contamina los freáticos y acaba convirtiendo el terreno en un suelo contaminado.

4.2. INDUSTRIA DE TRANSFORMADOS VEGETALES

El sector de manipulación y envasado de frutas y hortalizas es muy dispar en los distintos Estados Miembros de la UE, por su forma de aprovisionamiento, por el tipo de productos fabricados y consumidos y por la distinta estructura industrial.

La producción de frutas y hortalizas destinadas a la industria de la transformación se caracteriza globalmente por la existencia de un cierto número de áreas de producción especializadas, cuya competitividad viene determinada por las condiciones agronómicas, costes del factor trabajo, calendarios de producción, hábitos de consumo y la estructura industrial y logística. Así las zonas de Bretaña, Norte de Francia, Bélgica y Países Bajos, son zonas privilegiadas para la producción extensiva de hortalizas, debido a sus condiciones climáticas y a la existencia de explotaciones de tamaño mediano y grande que permitieron muy pronto la mecanización. Los países del área mediterránea concentran la producción de derivados de tomate y las conservas de frutas. En la Unión Europea se han superado los 9 millones de t de tomate en conserva en los años 1999 y 2000. Por países, los mayores productores son Italia (5 millones de t), España (1,5 millones de t), Grecia (1,2 millones de t) y Portugal (997.000 t) según datos del año 2001.

Dentro del sector de transformados vegetales se agrupan las industrias que procesan materia prima vegetal mediante cualquier técnica de conservación: esterilización por calor, congelación, desecación, etc.

Las principales actividades que se incluyen dentro del sector son la fabricación de:

- Conservas vegetales.
- Congelados vegetales.
- Zumos y concentrados vegetales.

La industria de transformados vegetales tiene unas características específicas propias que la diferencian de otros sectores de actividad:

- Por norma general las industrias del sector se localizan cerca de las áreas productoras. En el caso de España, por ejemplo, las plantas de fa-

bricación se localizan principalmente en la zona del Valle del Ebro (Navarra, La Rioja, Aragón, Cataluña), en la zona del Levante (Comunidad de Murcia y Comunidad Valenciana) y en Andalucía.
- La actividad industrial normalmente no es continua, sino que se trabaja por campañas, debido a los ciclos de crecimiento y maduración de los productos agrícolas. Con la finalidad de prolongar los periodos de actividad de las plantas de fabricación, la industria compra materia prima en otras zonas productoras con periodos de recolecciones anteriores o posteriores.
- La industria de transformados vegetales procesa una gran variedad de materias primas que requieren diferentes procesos de fabricación.
- Los agentes industriales del sector de transformados de frutas y hortalizas son de tamaño pequeño y mediano en su mayoría.

La producción española de conservas vegetales varía ligeramente de año en año en función de las cosechas, pero se mantiene en torno a las 600.000 toneladas anuales, de las que cerca de un 70% se comercializa en el exterior.

Aproximadamente el 39% del valor del total del sector es aportado por las conservas de hortalizas, mientras que las de frutas alcanzan el 32%. El 29% restante corresponde a conservas de tomate. El tomate es la conserva vegetal por excelencia dentro del mercado interior, en el que representa casi la mitad de las ventas en volumen. Otras conservas de frutas destacadas son las de cítricos y las de pera, y en otro orden, las confituras, las gelatinas y las mermeladas. España es el primer país productor de conservas vegetales dentro de la Unión Europea, algo menos de un tercio del total. A nivel mundial la gran potencia en conserva de vegetales es China.

En cuanto a la producción anual de vegetales congelados (390.000 t en el año 2000), tras un periodo con crecimientos moderados, parece haber entrado en una dinámica expansiva con un incremento interanual cercano al 12%. Entre los productos vegetales congelados, la principal producción es la de judías verdes (17,3% del total), seguidas por los pimientos (13,4%), los guisantes (11%), el brócoli (10,4%), las espinacas (7,8%) y el maíz (5,2%). Las frutas congeladas apenas tienen importancia y se producen anualmente algo más de 4.000 toneladas.

La producción española de zumos y néctares sigue una progresión muy positiva con un incremento interanual del 11,4%. Los mayores crecimientos se registran en los productos de mayor valor añadido, como los zumos refrigerados, néctares sin azúcar, y zumos directos o recién exprimidos.

Dentro de los transformados se incluyen vegetales congelados, en conserva y parcialmente transformados para consumo en fresco, si bien puede considerarse que la mayor parte corresponden a los dos grupos primeros. En todos los procesos de transformación y adecuación de la materia prima para el consumo se genera una importante cantidad de residuos, en este caso de naturaleza orgánica.

4.2.1. Generación de residuos orgánicos en procesos de transformación

Una gran parte de los residuos que se generan en la industria de transformados de fruta y vegetales está constituida por la fracción orgánica sólida derivada del tratamiento previo de las materias primas. Los destinos finales de estas fracciones son diversos:

- Alimentación animal.
- Metanización.
- Compostaje.
- Vertedero controlado.

Las técnicas de conservación utilizadas por las industrias que procesan materia prima vegetal son: esterilización por calor, congelación, desecación, etc. Entre el sector de fabricación destacan las siguientes actividades: conservas, congelados, zumos y concentrados. Las características de la industria de transformados alimenticios son las siguientes:

- Están localizadas cerca de las áreas productoras.
- La actividad no es continua, sino que se trabaja por campañas.
- Se procesan una gran variedad de materias primas que requieren diferentes procesos de fabricación.

La variedad de frutas y vegetales destinados a transformación es muy amplia: de hoja o tallo (espárrago, acelga, cardo, etc.), de fruto (tomate, pimiento, etc.), de flor (alcachofa), raíces y bulbos (puerros), leguminosas (judías verdes y guisantes), varios (champiñones, setas), cítricos (naranja, limón, etc.) y no cítricos (manzana, melocotón, ciruela, fresa, pera, etc.). Entre los transformados se incluyen, mayoritariamente, los congelados y la conserva, y, en menor medida, los transformados para consumo en fresco. En estos procesos de transformación y adecuación de

la materia prima vegetal se generan una gran cantidad de residuos de naturaleza orgánica.

En las primeras etapas de acondicionamiento de materias primas se generan una gran cantidad de residuos sólidos orgánicos. La cantidad total de residuos será la suma de los residuos sólidos (en seco) y los residuos sólidos arrastrados por el agua.

La Figura 8.27 muestra un esquema general del proceso.

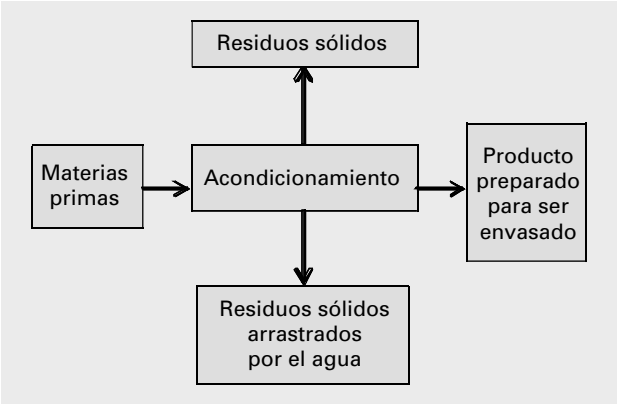


Figura 8.27. Residuos generados en transformados vegetales.

El porcentaje de residuos generados en la elaboración de transformados alimenticios depende de diversos factores:

- Tipo de materia prima.
- Tamaño y forma de los vegetales y la fruta.
- Partes aprovechables.

En la Tabla 8.25 se presentan los porcentajes aproximados de los residuos generados en función de la materia prima procesada.

Se debe tener en cuenta que dentro de cada producto elaborado existen diversas variables que influyen en la generación de residuos:

- Calidad de la materia prima.
- Sistemas de recolección.
- Calidad deseable en el producto final; en este caso se requiere selecciones de materias primas más rigurosas, de manera que aumenta el porcentaje de residuos.
- Tecnología de fabricación empleada.

4.2.2. Gestión y aprovechamiento de residuos

Los residuos sólidos orgánicos producidos en la transformación de vegetales, en algunos casos pueden considerarse como subproductos si bien son aprovechables para elaboración de otros productos como en el caso del espárrago y el puerro en los que a partir del proceso principal de obtención de producto entero se obtiene subproducto destinado a fabricación de tallos en conserva o congelados, productos deshidratados, etc. Los residuos restantes que quedan tras el máximo aprovechamiento en la industria transformadora también se utilizan con otros fines: alimentación animal, fertilizante u obtención de productos comercializables.

Tabla 8.25. Residuos generados por materia prima procesada.

Producto	Tipo de residuo	Porcentaje
Tomate	Pieles y pepitas	15
Pimiento piquillo	Corazones y restos de piel	53
Pimiento morrón	Corazones y restos de piel	63
Espárrago	Pieles	51
Alcachofa	Brácteas y tallos	63
Judía verde	Puntas	28
Champiñón	Cortes de raíz	21
Puerro	Hojas y raíces	47
Brotes de ajo	Partes blancas	17
Borraja	Hojas	28
Cardo	Pencas, hojas y corazón	65
Acelga	Pencas y hojas	48
Espinaca	Hojas secas	13
Melocotón	Pieles y huesos	25
Ciruela	Pieles y huesos	10

Se puede considerar subproducto (en el sentido agronómico de la palabra) a todo producto no principal obtenido en un determinado proceso y que tiene o puede tener determinadas aplicaciones o aprovechamientos, de forma que lo que para una industria es un subproducto para otra puede constituir la materia prima, obteniendo a su vez un producto principal y otro nuevo subproducto.

Actualmente, en la industria de transformados vegetales los principales destinos de los residuos sólidos orgánicos generados en sus procesos son:

- Alimentación animal: gran parte de los residuos orgánicos vegetales sólidos se destinan para alimentación animal, especialmente para bovino y ovino.

  El transporte de los residuos hasta la explotación ganadera es diario, es el ganadero el que

se encarga del traslado. Así estos residuos destinados a alimentación de ganado pueden considerarse no como residuos sino como subproductos.

Los residuos de transformados vegetales tienen un alto contenido en humedad lo que implica dificultades para el almacenamiento, el consumo debe ser rápido con el fin de evitar problemas de fermentación. Por otro lado el transporte del subproducto con niveles de humedad elevados, aumenta el coste del mismo.

Para incorporar el subproducto de transformados vegetales en fresco como un complemento importante en la alimentación animal es necesaria una correcta planificación en la que se tenga en cuenta: de qué productos se dispone, en qué cantidades al año y en que periodos de tiempo.

- Hay que tener en cuenta que la excesiva humedad que presenta el material original (puede alcanzar hasta el 92%), puede limitar el volumen de la ingesta e impedir el uso exclusivo en las raciones del ganado, por lo que parece conveniente la utilización conjunta de algún alimento concentrado.

En las zonas donde no existe ganadería los residuos orgánicos se trasladan al vertedero controlado correspondiente. En este caso el transporte lo realiza el organismo competente en el municipio o bien la propia empresa, lo que en cualquiera de los casos supone un coste de fabricación.

4.2.3. Alternativas de aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos de la industria de transformados vegetales

La mayor parte de los residuos generados en la transformación de vegetales se destina a alimentación para ganado. Sin embargo existe una fracción importante que va a vertedero, e incrementa el problema existente de falta de espacio. Para contribuir a la sostenibilidad del medio y satisfacer las necesidades de las generaciones actuales sin comprometer la satisfacción de las necesidades de las generaciones futuras es necesario recuperar en lo posible estos residuos.

4.2.3.1. Producción de compost

El compost, es el producto final obtenido mediante un proceso de descomposición biológica de la materia orgánica, en condiciones controladas de humedad y temperatura, que oscila entre 50 y 70 ℃, provocando, así, la destrucción de elementos patógenos y por tanto la máxima inocuidad posible del producto.

La estrecha relación existente entre el contenido de materia orgánica de un suelo y su fertilidad es un hecho ampliamente constatado y aceptado universalmente. La materia orgánica mejora la estabilidad del mismo, aumentando su porosidad y propiedad de retención hídrica, favoreciendo así el intercambio de gases y agua y la capacidad exploratoria del sistema radicular de las plantas. Asimismo aumenta su capacidad de cambio catiónico, favoreciendo la fijación de nutrientes, manteniéndolos durante más tiempo a disposición de las plantas. Del mismo modo, aumenta el estado de agregación del suelo y el desarrollo de su flora microbiana. Por todo esto, una de las vías más importantes de regeneración de suelos, sobre todo en la cuenca mediterránea, consiste en la incorporación al mismo de materia orgánica con objeto de restablecer sus propiedades por medio de todas las acciones directas o indirectas que ella ejerce.

4.2.3.2. Producción de metano

La fracción de residuos de transformados vegetales, en lugar de depositarlos en vertederos puede someterse a tratamiento con el resto de residuos urbanos para la obtención de metano. El metano se obtiene a través del proceso de fermentación anaeróbia de los componentes fermentables de los residuos. Dicha fermentación es producida por bacterias que se desarrollan en ambientes carentes de oxígeno. Durante el proceso de transformación de la materia orgánica (digestión) dichas bacterias producen un gas denominado por su origen «biogás», el cual se compone fundamentalmente de metano (CH_4) y de dióxido de carbono (CO_2).

La tecnología anaerobia aplicada a la biometanización de los residuos sólidos urbanos es un proceso con posibilidad de ser aplicada a cualquier tipo de fracción orgánica independientemente de su origen, de la forma de selección, o de su grado de humedad.

4.2.3.3. Obtención de bioalcohol

La obtención de etanol por fermentación alcohólica ha cobrado interés debido a la posibilidad de utilizar alcohol como combustible. La fermentación alcohólica se lleva a cabo por numerosos microorganimos anaerobios o aerobios facultativos a partir de azúca-

res presentes en las distintas formas de biomasa. Estos azúcares se pueden encontrar en forma de polímeros: almidón y celulosa.

Los residuos producidos por la industria de conservas vegetales, por su contenido en celulosa, pueden utilizarse como fuente de energía renovable, evitando así su acumulación. La fracción celulósica de los residuos, se transforman, mediante hidrólisis, en glucosa, que por fermentación se convierte en combustible (etanol).

4.2.3.4. Producción de sustancias con alto valor agregado

Dentro de las materias primas de la industria alimentaria, las frutas y vegetales se caracterizan por ser las que mayores residuos generan. Estos subproductos contienen valiosas sustancias como azúcares, ácidos orgánicos, sustancias colorantes, proteínas, aceites y vitaminas, entre otras que pueden ser de interés en las industrias alimentarias, farmacéuticas, químicas y de cosmética, fundamentalmente.

Durante las últimas décadas ha aumentado la industrialización de subproductos de cítricos con los siguientes objetivos:

- Aprovechamiento de la pulpa para mejorar el aroma y la sensación bucal de zumos reconstituidos.
- Aprovechamiento de las cortezas de cítricos como ingredientes de piensos para alimentación animal.
- Extracción de aceites esenciales empleados como aromatizantes.
- Extracción de terpenos que tienen numerosas aplicaciones en la industria química.
- Obtención de pectinas empleando como materia prima el albedo.
- Extracción de los flavonoides hesperidina y naringina de la corteza de cítricos, empleados en la industria farmaceútica. La naringina se usa como materia prima para la obtención de una sustancia de alto poder edulcorante, que no aporta calorías, llamada dihidrochalconoa. Además añadida en pequeña cantidad al aceite de palma inhibe su oxidación térmica. También se ha encontrado que desempeña un papel importante en los tratamientos de resfriados, quemaduras por frío y por irradiación.
- Aprovechamiento de carotenoides como pigmentos naturales para la mejora de la coloración de los jugos simples y concentrados, bebidas refrescantes, jaleas, caramelos duros, helados, yogur, etc.
- En la elaboración de zumo de manzana, se genera un residuo de pulpa de manzana tras el prensado de las manzanas trituradas. La pulpa producida tiene alrededor de un 20-30% de extracto seco, 1,5-2,5% de pectina y 10-20% de hidratos de carbono. Aparte de su uso para alimentación animal bien directamente o tras un secado, puede emplearse para la producción de pectina, y además puede usarse directamente como fibra dietética y como relleno de tartas.
- En el caso del tomate, es cada vez más valorado su contenido en licopeno. El licopeno es un carotenoide responsable de la coloración de los tomates maduros, pero su uso como colorante alimentario se ve limitado ya que los sistemas de extracción son muy costosos y presenta una baja estabilidad. Sin embargo su extracción puede ser interesante en el campo de la medicina. Recientes estudios han relacionado de forma directa el licopeno con la prevención de cierto tipo de cáncer en el hombre, especialmente el cáncer de próstata, así como con una menor incidencia de afecciones coronarias como la arteriosclerosis. No se han establecido plenamente las bases biológicas ni fisicoquímicas de estas propiedades, pero parecen directamente relacionadas con el elevado poder antioxidante del licopeno. Hay que tener en cuenta que aproximadamente el 50% del licopeno se concentra en la cutícula y en la pulpa adherida a ella, los residuos generados en la transformación de tomate podrían ser una fuente de licopeno.

4.2.4. Proceso de enlatado de frutas

Preparación y llenado de envases. La preparación de las latas implica la limpieza previa con vapor o agua a presión. Posteriormente se llenan las latas con las frutas y se llevan a un depósito donde se cuecen las frutas mediante vapor a presión. Los residuos generados son aguas, que pueden volver a reutilizarse en el proceso, y latas en mal estado.

Efluentes líquidos. El proceso de enlatado de frutas genera dos tipos de residuos: líquidos y sólidos. Las aguas residuales se generan durante el lavado y el pelado de la fruta. Para pelar las piezas se utiliza una gran cantidad de agua. Estas aguas se caracterizan

por una elevada DBO y un alto contenido en materias en suspensión, a causa del azúcar contenido en la fruta. Además, arrastran pepitas, hojas y ramas que, al separarlas del agua, darán lugar a los residuos sólidos.

Pretratamiento de aguas residuales. Los más habituales son el tratamiento químico y mecánico y la digestión aerobia y anaerobia. Con la neutralización de las aguas se evita dañar el equipo y eliminar los microorganismos. Los métodos mecánicos separan las materias en suspensión: el tamizado permite segregar los sólidos gruesos, la filtración elimina los sólidos de diámetro menor y la floculación retira los sólidos en suspensión. Los métodos biológicos transforman los compuestos insolubles en solubles, mucho más fáciles de eliminar. Los métodos aerobios convierten los compuestos orgánicos en CO_2, mientras que los métodos anaerobios los transforman en CH_4.

La Figura 8.28 muestra la generación de residuos en el proceso de enlatado de frutas y verduras.

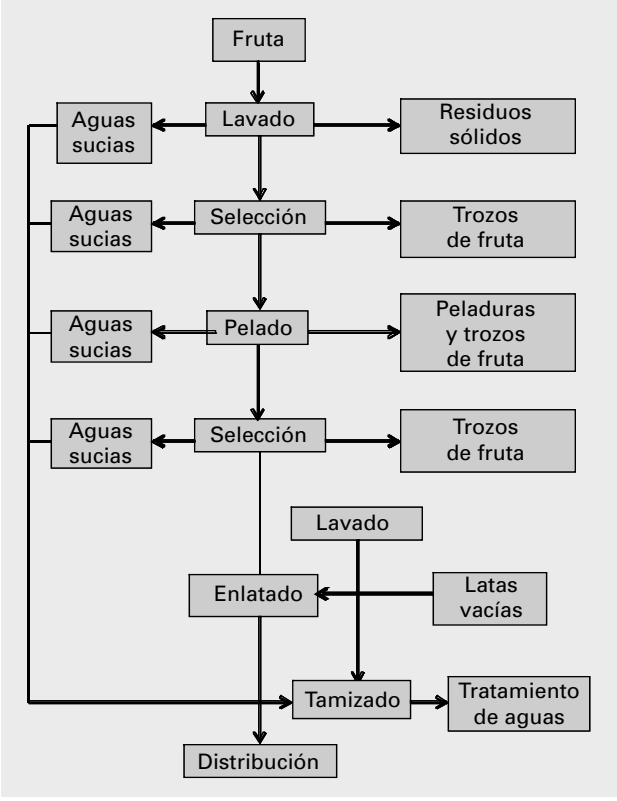


Figura 8.28. Proceso de enlatado de frutas y verduras.

4.3. INDUSTRIA CÁRNICA

En la industria de la carne roja se incluye la carne de ternera, cerdo (excepto la utilizada para salchichas) y cordero.

En una planta de procesado de carnes rojas se suelen sacrificar unas 4.000 cabezas de ganado al día, de las que se aprovecha prácticamente todo (Con las excepciones que se han mencionado en el Capítulo 4 debido a la EEB). La composición es, aproximadamente, de un 62% de carne, un 18% de grasas y alimento no digerido, un 10% de pieles y pelo, y un 10% de huesos y vísceras. Las pieles pueden aprovecharse en la industria del curtido; mientras que con los huesos y las vísceras se pueden elaborar piensos animales y fertilizantes, tal como sintetiza la Figura 8.29.

Principales contaminantes. En este tipo de industrias, se generan principalmente dos tipos de residuos: sólidos y líquidos. Los residuos sólidos están formados por estiércol, huesos, trozos de pieles, etc. El alimento no digerido se puede retirar por procedimientos mecánicos, y puede utilizarse como alimento del ganado a causa de su elevado valor nutricional: 65% de agua, 25% de proteínas y 10% de carbohidratos, aproximadamente.

Las aguas se caracterizan por valores elevados de DBO, y altas concentraciones de sólidos en suspensión, aceites y grasas. La sangre y los trozos de carne son los causantes de la DBO, que puede reducirse mediante el tratamiento del agua con métodos químicos. Los sólidos en suspensión se generan principalmente durante la etapa de lavado de las piezas que entran al matadero, y pueden eliminarse mediante tamizado y filtración de las aguas. Los aceites y grasas pueden retirarse de los efluentes líquidos con tratamientos químicos o mecánicos.

Métodos de pretratamiento de efluentes líquidos. Existen tres métodos de pretratamiento de las aguas residuales (si bien algunas veces se emplean todos en

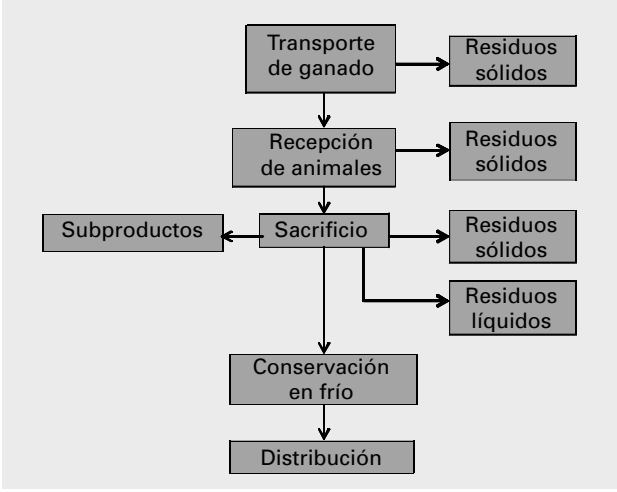


Figura 8.29. Procesado de carne.

serie): tamizado, tratamiento biológico y flotación. Con el tamizado se eliminan los sólidos gruesos: huesos y trozos de pieles. Los tratamientos biológicos aeróbios y anaeróbios se utilizan para retirar los compuestos orgánicos y disminuir los valores de DBO. La técnica de flotación por burbujas de aire sirve para eliminar las grasas animales. Las burbujas arrastran las grasas hacia la superficie, donde se pueden retirar más fácilmente. Es muy importante un diámetro de burbuja pequeño, para optimizar su superficie específica y aumentar la eficacia del proceso. Otro método aplicable consiste en solidificar las grasas y extraerlas mediante sedimentación.

4.3.1. Subproductos de la industria cárnica

Dentro de este apartado es preciso mencionar los siguientes subproductos:

4.3.1.1. Subproductos cárnicos

En los mataderos se obtienen diariamente diversos tipos de subproductos: sangre, huesos, pelo, pezuñas, etc. En el ganado vacuno, estas partidas pueden representar el 40% del peso en vivo del animal. Cuando se trata de cerdos, corresponde a un 25%, mientras que en el ganado ovino representa un 30%.

Los subproductos cárnicos son aquellas materias obtenidas de los animales de abasto y que no comprenden el canal ni los despojos. Canal es el cuerpo de los animales después del sacrificio desprovisto de vísceras abdominales o torácicas. Los despojos son las partes comestibles no comprendidas en el término canal: riñones, hígado, tripas, sesos, estómago, etc.

Estos subproductos pueden ser utilizados para alimentación humana siempre que se den las condiciones higiénico-sanitarias necesarias. Cuando son destinados a alimentación animal, no son necesarias las mismas precauciones higiénicas, aunque sí se debe proceder a su esterilización durante el proceso de transformación. Entre el destino de los subproductos se puede distinguir:

- Alimento humano.
- Alimento animal.
- Otros usos (cosméticos, jabón, etc.).

Los subproductos cárnicos están compuestos de hidratos de carbono, proteínas, lípidos, sales minerales, vitaminas y agua. Para su transformación en harinas, es necesario evaporar la mayor parte del agua y separar la fase sólida no grasa de la grasa propiamente dicha.

Tabla 8.26. Composición porcentual de algunos tejidos animales

	Proteínas	Hidratos de carbono	Grasas	Agua	Sales minerales
Carne	12-20	0,1-3,3	6-20	60-80	0,5-1
Huesos	15-22	0,1-0,7	15-16	30-40	15-22
Grasas	1-10	0,3	60-85	5-20	0,3-0,5
Sangre	18,6	0,8	0,2	80	0,9

En la Tabla 8.26 se muestra la composición (en %) de algunos tejidos animales.

Las proteínas son sustancias compuestas por carbono, hidrógeno y nitrógeno, con la presencia de otros elementos: fósforo, hierro o azufre. Después del agua, representa la parte más importante de los organismos animales y vegetales.

Los hidratos de carbono son la fuente de energía de los organismos vivos, los que suministran el combustible necesario para los movimientos, y están compuestos por carbono, hidrógeno y oxígeno ($C_nH_{2n}O_n$).

Las grasas son compuestos de carbono, hidrógeno y oxígeno, y desprenden más energía en su combustión que los hidratos de carbono. Se oxidan fácilmente en presencia de oxígeno, formando ácidos grasos volátiles y olorosos. Ello origina el enranciamiento, que puede evitarse con la conservación a bajas temperaturas y en atmósfera anóxica. Los productos obtenidos en el enranciamiento son aldehídos, cetonas y alcoholes, que dan el típico olor rancio; además, en ocasiones pueden resultar tóxicos. La grasa animal está contenida principalmente en la zona adiposa.

Las sales minerales (calcio, hierro, fósforo, sodio, etc.) son necesarias en los organismos superiores: forman parte de huesos y dientes, mantienen el equilibrio osmótico en los líquidos corporales y el equilibrio ácido-base, etc. Las sales son el residuo que queda después de quemar los hidratos, grasas y proteínas de un alimento o producto.

El poder calórico es la cantidad de calor generado en la combustión completa por unidad de sustancia, mientras que la combustión de hidratos, grasas y proteínas dentro del organismo animal no es tan completa.

4.3.1.2. Piel

Es uno de los artículos más antiguos que se conocen. Los primeros objetos de piel se hicieron cuando se trataban las pieles con extractos vegetales para ha-

cerlos resistentes al clima. En el proceso de curtido por cromo, el baño de decapaje consiste en una mezcla de sales y ácido sulfúrico. Después, las pieles se sumergen en una solución de dicromato sódico y se tratan con tiosulfato de sodio en el tambor de reducción. Posteriormente, se trata en tambores de sedimentación con bórax para fijar la sal de cromo en las fibras. La industria de la piel, como la del aluminio, acero o petróleo consume gran cantidad de energía.

4.3.1.3. Gelatina

Es una sustancia proteica coloidal de origen orgánico nitrogenado. La gelatina de tipo A se elabora a partir de pieles que después de lavarse se sumergen en HCl, H_3PO_4 o H_2SO_4 a un pH entre 1,0 y 3,0. Se ajusta el pH a 4,0 y se efectúan cinco extracciones. Después, el líquido se desengrasa, filtra, desioniza y concentra en dos etapas. La solución concentrada se congela, se corta y se seca a menos de 60 ℃. El material seco se muele y se mezcla con otras gelatinas para producir las especificaciones deseadas. Más del 55% de este tipo de gelatina se emplea como alimento.

La gelatina de tipo B se fabrica a partir de huesos, pieles y cueros. El material se desengrasa en un baño de HCl, y posteriormente se tratan en una fosa con cal. Cuando el tratamiento se completa, se ajusta la muestra a un pH entre 5,0 y 7,0, se extrae y se concentra.

4.3.1.4. Adhesivos

La cola de origen animal es el tipo más antiguo de adhesivo, y es conocido desde hace más de 3.300 años. La producción de cola es casi idéntica a la manufactura de gelatina. El procedimiento consiste en moler y cortar los huesos y pellejos en trozos pequeños, y lavarlos. Después de realizar diversas extracciones con agua caliente, se filtran las soluciones, se congelan y posteriormente se secan. Para finalizar, se muelen las muestras, se mezclan y se empacan en bolsas adecuadas.

4.3.2. Aprovechamiento de la sangre

La composición promedio de la sangre se muestra en la Tabla 8.27.

Esta composición es una media general con respecto a muchos animales. Dependiendo de si se trata de ganado vacuno u ovino, la composición variará.

Tabla 8.27. Composición porcentual de la sangre animal

Componentes	Composición (%)
Agua	80,0
Glóbulos sanguíneos	12,0
Albúmina	6,1
Fibrina	0,5
Grasa	0,2
Cenizas	0,9
Otras sustancias	0,03

El destino final de la sangre suele ser:

- Producción de plasma. Muy usado como ligante en embutidos. Se obtiene por centrifugación de la sangre.
- Producción de harina. Utilizada como pienso. Se obtiene por secado de la sangre.

El 70% de la sangre se utiliza para la obtención del plasma, y el resto para harina. De esta forma, los mataderos con instalaciones para la fabricación de embutidos tienen el plasma que necesitan, y no desperdician los glóbulos rojos sobrantes.

Tabla 8.28. Contenido de sangre en % de peso del animal

Animales	Contenido en sangre (en %)
Vacas	3-4
Terneros	5-6
Cerdos	3-4
Cerdas	3-3,5
Ovejas	4-4,5
Corderos	3,5-4

En la Tabla 8.28 se muestran los porcentajes aproximados de sangre contenida en diversos animales, relativos al peso en vivo.

La sangre animal, subproducto de la industria cárnica fue tratada históricamente como un residuo contaminante que era vertido en compañía de otras aguas sucias al medio receptor causando graves episodios de contaminación en cauces fluviales. Para tener una idea aproximada del impacto ecológico de la sangre, baste con decir que el vertido diario de 15.000 litros de sangre (obtenida a partir del sacrificio de 5.000 cerdos o 1.500 vacunos) al cauce de un río provoca un daño similar a la polución ocasionada por una población de 80.000 habitantes que no depure sus aguas residuales.

Dado el importante impacto medioambiental generado por vertidos incontrolados de sangre al medio receptor, y considerando la abundante presencia de proteína presente en dicho fluido, es objetivo básico conceptuar a la sangre como importante materia prima susceptible de ser valorizada mediante aislamiento de los diferentes componentes que la integran como si de un petróleo rojo se tratase.

El desarrollo tecnológico a aplicar debe permitir la obtención de diferentes fracciones caracterizables según diferentes generaciones de productos.

- 1.ª Generación: Obtención y comercialización de harina de sangre, proteína plasmática y glóbulos rojos.

  La primera destinada al área de alimentación animal y abonos orgánicos, el segundo al área de alimentación humana (tecnología alimentaria), y el tercero destinado entre otros al área de alimentación humana y animal, abonos orgánicos, etc.
- 2.ª Generación: Productos con valor añadido mejorado respecto a aquellos otros de 1ª generación.

  Obtención de colorante natural basado en hemoglobina estabilizada cromáticamente, para ser aplicada en tecnología alimentaria del sector cárnico como colorante afín con la proteína cárnica por cuanto el uso de dicha hemoglobina permite corregir las bajas pigmentaciones naturales que presentan los músculos de algunas carnes como consecuencia, entre otras, del tipo de explotación ganadera intensiva que se ha ido generalizando.

  De este modo pueden reemplazarse los colorantes sintéticos habitualmente utilizados como única alternativa disponible por el técnico alimentario para incrementar el nivel de pigmentación de los elaborados cárnicos.
- 3.ª Generación: Producción y comercialización de hidrolizados de proteína para ser aplicados en el sector de alimentación humana (nutrición y tecnología alimentaria) así como en el área de la biotecnologia (medios de crecimiento).

  Obtención de peptonas hémicas que presenten absorción intestinal mejorada con respecto a otros fármacos basados en sales o complejos de hierro, para ser administrados en el área de farmacia humana como correctores de ferropenias anémicas.

  Obtención de HEMINA, grupo prostético presente en la hemoglobina, que al ser considerado como reactivo SINTÓN permite derivar importantes estructuras moleculares de aplicación en el área de farmacia humana (terapias y reactivos de diagnóstico).
- 4.ª Generación: Obtención y comercialización de inmunoglobulinas que ayuden a mejorar la respuesta inmune humoral de organismos de la misma especie afectados por cuadros de morbilidad.
- 5.ª Generación: Aislamiento y comercialización de componentes minoritarios presentes en la sangre tales como enzimas, fibrinógeno, etc.

Desde la década del los 80 con la aparición y propagación de la Encefalopatía Espongiforme Bovina (EEB) se ha incrementado el nivel de susceptibilidad para la utilización de la sangre como alimento tanto para animales como para humanos. Sin embrago no se han encontrado indicios que la enfermedad se transmita a través de la sangre del animal.

La Encefalopatía Espongiforme Bovina (EEB) es el nombre científico de una enfermedad que es conocida coloquialmente como «enfermedad de las vacas locas» y que fue diagnosticada por primera vez en el Reino Unido en los años 80. Es una afección degenerativa incurable del sistema nervioso central de los bovinos, que se caracteriza por la aparición de síntomas nerviosos en los animales adultos, que progresivamente, concluye con la muerte del animal.

La enfermedad está causada por un agente transmisible no convencional que es una proteína infecciosa denominada «prión». Esta enfermedad se caracteriza por tener un periodo de incubación prolongado en torno a los 4 ó 5 años. Los síntomas de esta enfermedad están motivados por la acumulación del prión en las células neuronales, originando la muerte celular. Un análisis microscópico revela lesiones como vacuolas que dan al tejido nervioso un aspecto de esponja.

La vía de transmisión de esta enfermedad conocida hasta la fecha es la ingestión por los animales de alimentos contaminados con el prión. Además, la información científica de que se dispone indica que existe un riesgo de transmisión de la madre afectada a los terneros nacidos de ella. Por esta razón, la normativa comunitaria considera materiales especificados de riesgo (MER):

- El cráneo, incluido el encéfalo, los ojos, las amígdalas, la médula espinal de los bovinos de más de doce meses de edad y el intestino, del duodeno al recto, de los bovinos de cualquier edad.

- El cráneo, incluido el encéfalo y los ojos, las amígdalas y la médula espinal de los ovinos y caprinos de más de doce meses de edad o en cuya encía haya hecho erupción un incisivo definitivo, así como el bazo de los ovinos y caprinos de todas las edades
- Los cadáveres de los bovinos, ovinos y caprinos de cualquier edad.

Asimismo, todos los animales bovinos muertos en las explotaciones ganaderas no sacrificados para el consumo humano tendrán la consideración de MER y deberán ser eliminados del mismo modo.

Los materiales especificados de riesgo (MER) deben de ser eliminados de la cadena de alimentación humana y animal con el fin de evitar los riesgos de transmisión de la enfermedad. Para ello los órganos y tejidos definidos como MER son retirados de la canal del animal durante su procesado en el matadero y sometidos a un proceso de tinción para su identificación permanente.

Tras la retirada de estos MER los mismos deben ser tratados para asegurar su correcta destrucción mediante su tratamiento a temperatura y presión elevada y su posterior incineración o eliminación en vertederos autorizados. Es más aconsejable someterlos a la incineración directamente o previo procesado con un tratamiento de reducción de volumen.

4.3.3. Tratamiento de aguas residuales en las industrias cárnicas

El tamaño del matadero y el aprovechamiento de los subproductos determinarán el volumen y la carga contaminante de las aguas residuales, que provienen de todas las secciones del matadero (matanza, despiece, tripería, etc.). En la Figura 8.30 se muestra el flujo de aguas residuales en un matadero, con el valor de DBO_5 (en mg/l) dependiendo del lugar del matadero del que provengan. La mezcla de todos ellos tiene una DBO_5 comprendida entre 1.200 y 1.800 mg/l.

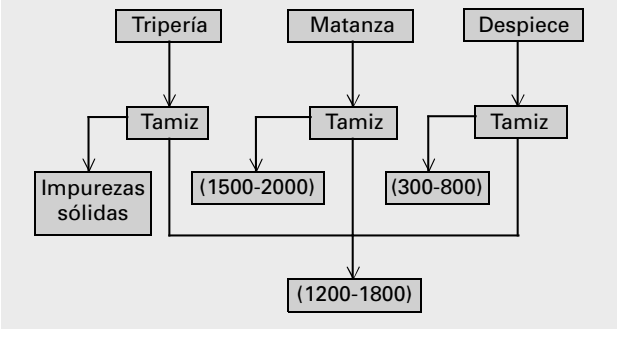


Figura 8.30. Flujo de aguas residuales en matadero. DBO_5 mg/l.

En una instalación de tratamiento de aguas residuales de un matadero, los residuos líquidos pasan por un tamiz y posteriormente por un tanque de regulación, donde se mezclan las aguas provenientes de los diferentes lugares de la industria. Para ajustar el pH, se hace pasar la muestra por un tanque dosificador de ácido sulfúrico y sulfato de aluminio.

Después se somete a un proceso de flotación, donde se inyecta aire comprimido, y se recogen las aguas limpias por la parte inferior (neutralizando con CaO si anteriormente se usó H_2SO_4), mientras que por la parte superior se recogen los fangos (con un 10% de materias sólidas).

Los fangos se someten a espesamiento. En tanques de agitación se añade CaO (para su neutralización) y sangre cruda. Se calienta hasta unos 60 ℃ y se envía a un coagulador donde precipitan las proteínas.

La Figura 8.31 muestra el esquema general de tratamiento de aguas residuales de un matadero.

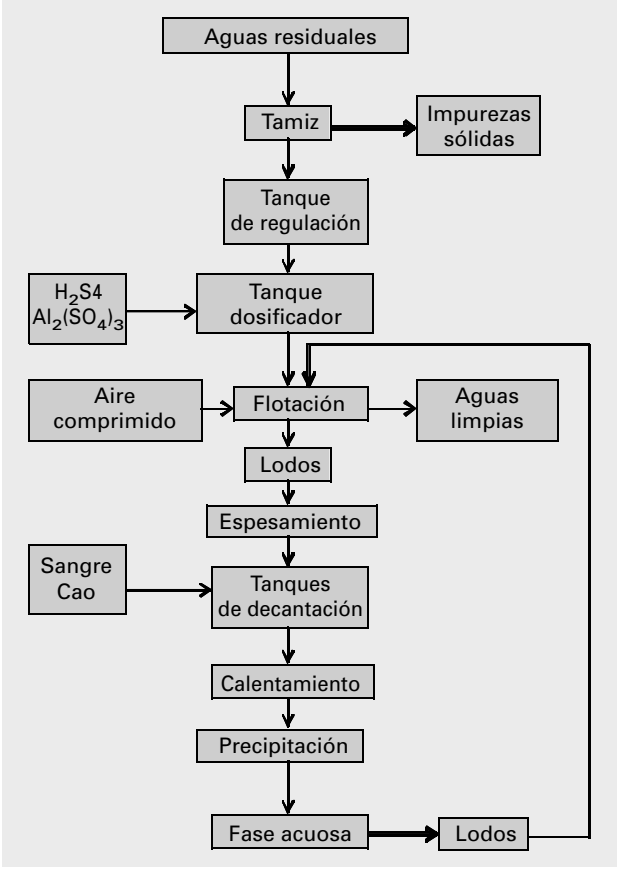


Figura 8.31. Tratamiento de aguas residuales en matadero.

4.4. INDUSTRIA VINÍCOLA

Como sucede con todas las industrias, la industria vinícola genera una elevada cantidad de residuos, de naturaleza orgánica, que son susceptibles de valorización o, en todo caso deben ser gestionados para evitar su impacto medioambiental.

Los principales residuos orgánicos de la industria vinícola son: orujos (restos de uva prensada), lías (precipitados durante la fermentación y maduración) y vinazas (aguas de lavado).

A pesar de que los residuos no tienen un carácter peligroso, pueden provocar impactos ambientales si su gestión no es correcta: aumento de la DBO, presencia de sólidos en suspensión y sales disueltas, eutrofización, variación del pH. La gestión de estos residuos es difícil, ya que son generados en grandes cantidades y en cortos periodos de tiempo. Una de las posibilidades de gestión es la eliminación en vertederos o su aprovechamiento energético gracias a los novedosos sistemas de conversión energética. Como alternativa a estos sistemas, que suponen un elevado impacto ambiental, se han desarrollado unas técnicas de valorización que permiten recuperar los recursos contenidos en los residuos, además de reducir el impacto ambiental.

El proceso de elaboración de los vinos blancos es diferente del de los vinos tintos. En los vinos blancos, la fermentación del mosto se realiza tras la separación de los orujos; mientras que en los vinos tintos se produce una fermentación conjunta del mosto y los orujos.

En el caso del vino blanco, la uva se transporta a las despalilladoras donde se separa el raspón de los granos de uva. Posteriormente se trituran los granos en una estrujadora, y se separa la masa en dos fracciones: el mosto flor y una masa pastosa que posteriormente se prensará para obtener un mosto con el que se obtendrá un vino de segunda calidad. En este prensado se genera el orujo, compuesto por pulpa, hollejo, pepitas y raspones no eliminados anteriormente.

A continuación se realiza un desfangado para eliminar los sólidos en suspensión del mosto y el material filtrante colmatado. El mosto se introducirá en unos tanques donde se procederá a la fermentación, a partir de la cual se obtiene el vino. Cuando el vino se trasiega a otros depósitos, en el fondo de los tanques de fermentación quedan las lías, que son unos fangos compuestos por vino, levaduras muertas, sales tartáricas y pepitas. El vino es sometido a clarificación al final del proceso de maduración mediante la acción de los clarificantes (bentonita, gelatinas, etc.) que precipitan las heces, o turbios del vino. Mediante enfriamiento del vino se precipitan los tartratos, que quedan depositados en el fondo y paredes de las cubas. En el filtrado del vino se generan residuos del material filtrante colmatado.

El raspón es separado de la holleja a la salida de la alcoholera y secado para su valorización. Esta es doble. En primer lugar se extrae aceite. Aproximadamente del grano de uva seca se extrae, por medio de disolventes, un 15% de aceite de gran calidad. La biomasa resultante, que contienen un 10% de humedad, posee un PCI de casi 4.000 kcal/kg por lo que es una biomasa valorizable para generar energía que precisa la misma planta (la extracción del aceite por disolventes, precisa vapor de agua).

En el caso del vino tinto, el orden de las operaciones es diferente, de manera que variarán las características de los residuos generados.

Durante las operaciones de limpieza de los tanques, se generan aguas residuales con elevada concentración en DQO y sólidos en suspensión. Cuando las vinazas y las lías no son gestionadas correctamente, la carga contaminante de las aguas aumenta considerablemente.

La Figura 8.32 muestra un esquema general de la generación de residuos en la elaboración del vino

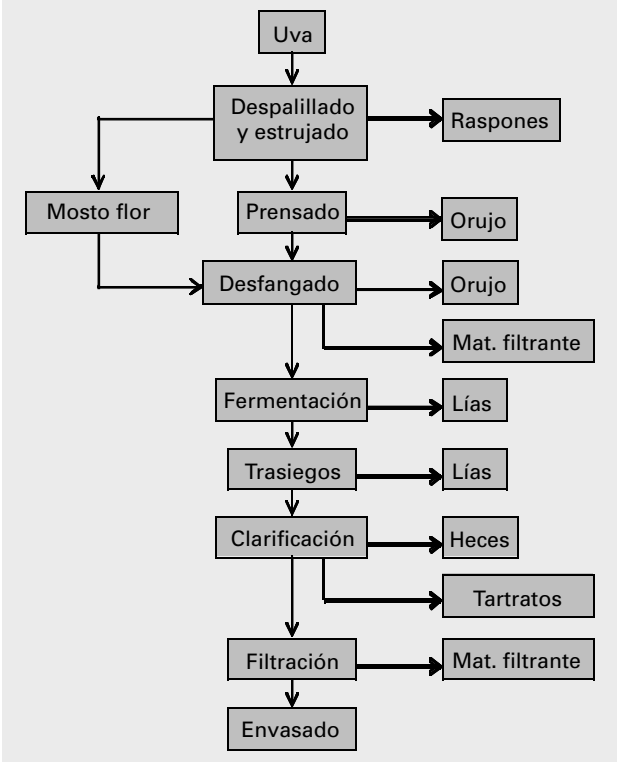


Figura 8.32. Proceso de elaboración del vino blanco.

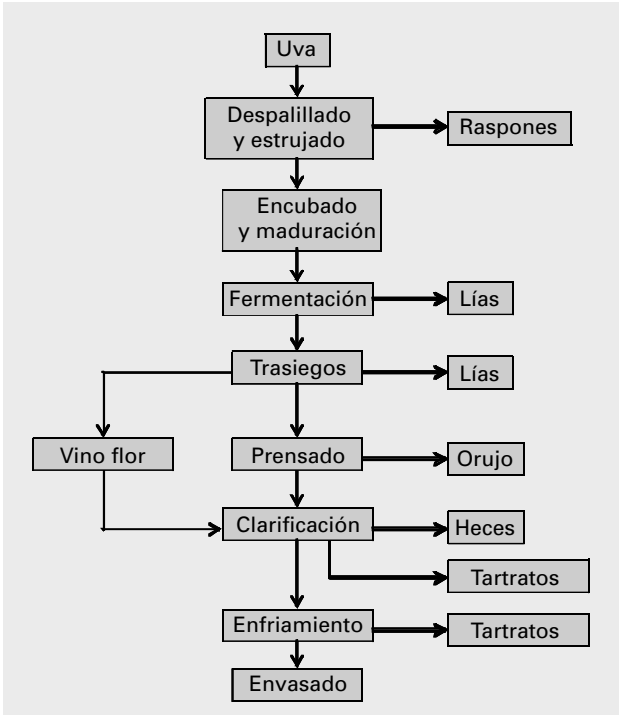


Figura 8.33. Proceso de elaboración de vino tinto.

blanco, mientras que la Figura 8.33 corresponde al vino tinto.

4.5. INDUSTRIA OLEÍCOLA

El cultivo del olivar y la extracción del aceite de oliva generan grandes cantidades de subproductos y residuos cuya eliminación constituye uno de los mayores problemas medioambientales en los países mediterráneos.

El proceso de producción de aceites vegetales en «tres fases», generador de aceite, alpechín (aguas muy contaminantes) y residuos sólidos (u orujo de tres fases), está siendo sustituido por el de «dos fases», que representa un ahorro en el consumo de agua y energía, y evita la producción de alpechines. El proceso de dos fases permite obtener aceite y orujo de dos fases. En el proceso de desecado y extracción industrial del orujo de dos fases para la obtención de aceite de oliva se generan orujos secos y extractados. Este tipo de orujo, de naturaleza lignocelulósica, se caracteriza por una elevada relación C/N, escaso contenido en nutrientes y elevada fitotoxicidad. Por otra parte, los huesos de aceituna triturados suelen ser utilizados para la obtención de carbón activo. Los orujos de dos fases pueden ser empleados como biocombustibles para la cogeneración.

En la Figura 8.34 se muestra el diagrama de flujo de la obtención de aceite de oliva a partir del proceso de dos fases.

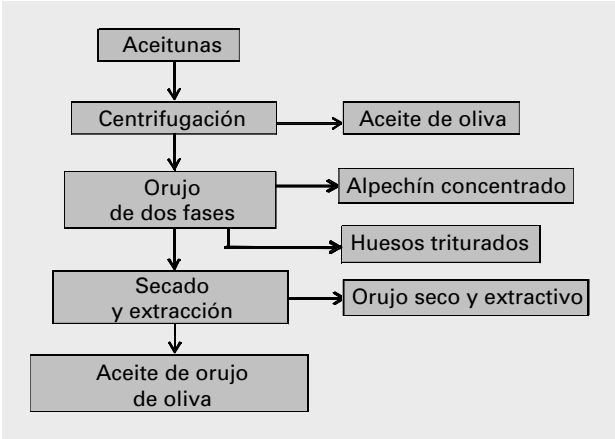


Figura 8.34. Proceso de obtención de aceite de oliva.

El aceite de orujo, muy usado en España, es un subproducto del aceite de oliva virgen, que se obtiene de la molturación de los residuos sólidos recuperados después de la primera presión y centrifugado (algo de aceituna y trozos de hueso). En este proceso se utilizan habitualmente disolventes para optimizar la producción. En el proceso de calentamiento al que se someten los mencionados residuos para evaporar los disolventes, se puede originar una toxina llamada benzo-a-pireno.

4.6. LA INDUSTRIA AZUCARERA

En España, el 99% de la producción de azúcar proviene de la remolacha azucarera, fundamentalmente de las comunidades de Castilla y León y de Andalucía. El cultivo de la caña de azúcar en nuestro país es, por razones climáticas, minoritario y se reduce a tan solo una pequeña región de Granada en donde existe un microclima tropical.

El azúcar rinde 4.000 Kcal/kg, y es el sustrato energético por antonomasia. No obstante no es recomendable un consumo superior al 10% de la ingesta calórica total. De su abuso se pueden derivar trastornos como la obesidad, caries dental, diabetes mellitus tipo II, etc.

El procesado para la obtención de azúcar que siguen la remolacha y la caña, son similares. A continuación se describe el proceso de fabricación del azúcar de remolacha y se comentarán las diferencias con respecto a la caña de azúcar.

4.6.1. Azúcar de remolacha

El azúcar de remolacha alcanzó una gran relevancia como materia prima sólo después de incrementar el contenido en azúcar mediante cultivo selectivo. Gracias a un cultivo extraordinariamente mejorado, la remolacha azucarera alcanza hoy día, a mediados de Octubre, contenidos máximos de azúcar de 15-20% con respecto al peso total de la planta, frente al exiguo 4-5% que se conseguía en un principio. La obtención del azúcar a partir de esta planta, se realiza de la siguiente manera:

- *Recepción de la materia prima*: La remolacha es recolectada y se le elimina el tallo y las hojas ya que, la raíz es la parte interesante de la planta para la producción de azúcar.
- *Lavado*: Se efectúa tan pronto como sea posible para eliminar material incomestible tales como hojas, piedras, arena, etc. Como en otras industrias alimentarias, es un proceso multietapa, es decir, en un primer momento se elimina la suciedad adherida al alimento, pasando luego por un desarenador, despedrador etc.
- *Cortado*: La planta una vez lavada, pasa por un molino y se producen unos filamentos finos y largos. Allí se corta la planta en trozos pequeños de tamaño del orden de milímetros. Este proceso tiene como finalidad conseguir diluir en agua la sacarosa presente en la planta. Si el tamaño de trituración fuera escaso la planta presentaría una menor superficie de contacto y por tanto la extracción sería muy deficiente.
- *Difusión*: Este proceso tiene como finalidad extraer la sacarosa de las partículas de remolacha al agua caliente que hay en el difusor. Se hacen pasar en dirección opuesta líquido y planta. El material vegetal una vez que se le ha extraído la sacarosa, recibe el nombre de pulpa agotada.
- *Prensado*: La industria azucarera además de fabricar azúcar produce subproductos tales como pulpa, melaza, etc. En este caso, la pulpa es prensada para conseguir una mayor densidad para así, conseguir abaratar posteriores procesos de manipulación y transporte. El destino de la pulpa es la alimentación del ganado.
- *Depuración y filtración de jugos*: La finalidad de este método es eliminar las impurezas del jugo. Para ello se añade al jugo cal en forma de lechada (hidróxido cálcico diluido en agua) y gas carbónico. Como consecuencia, y tras la filtración, se obtiene por una parte el jugo purificado y por otro los fangos que contienen un producto espumoso compuesto por las impurezas, la cal y el gas carbónico que suele ir destinado habitualmente a tierras ácidas para conseguir de esta manera enriquecer terrenos para distintos cultivos.
- *Evaporación*: En este proceso se elimina por la aplicación de calor, las dos terceras partes del agua presente en el jugo obteniéndose el jarabe.
- *Filtración*: Se somete el jarabe a una segunda filtración, esta vez al jarabe, para eliminar posibles impurezas que hayan podido quedar. El tamaño de luz del filtro suele ser de 50 μm.
- *Cristalización*: Se realiza en tres etapas. Consiste en someter a cocción el jarabe de sacarosa para producir granos de sacarosa. La parte líquida que no cristaliza se denomina miel y se intenta de nuevo cristalizarla. La cristalización se realiza en un recinto denominado tacha. Se efectúa un vacío durante la cristalización para, de esta manera, no tener que subir tanto la temperatura para la cocción, de lo contrario el azúcar tomaría color caramelo. En cambio, con este proceder se logra un azúcar blanco.
- *Centrifugación*: Su finalidad es la separación del azúcar cristalizado y la miel o melaza.
- *Secado*: Tanto el azúcar blanco como el refinado son prácticamente sacarosa y abandona la centrífuga con un contenido en humedad de 0,5-1%. Para su almacenamiento se deseca a 0,03-0,05%. Mediante aire seco y templado se rebaja la humedad del azúcar cristalizado para así, aumentar su vida útil.
- *Almacenamiento*: El azúcar cristalizado se introduce en unos silos que pueden ser de forma variable, cónica, cilíndrica, etc. Las condiciones del interior se mantienen constantes en el tiempo a través de aire que regula la temperatura y humedad. El ingreso del azúcar en silos se da en el caso de que el producto no vaya a ser usado para consumo directo porqué, de lo contrario, se ensaca en la fabrica directamente.

4.6.2. Azúcar de caña

La caña de azúcar es una gramínea tropical que pertenece a la misma familia que el sorgo y el maíz. Actualmente, la caña de azúcar que se cultiva para una mayor producción de sacarosa, es un híbrido complejo proveniente de dos o más variedades de especies diferentes.

La elaboración del azúcar de caña comienza con la obtención del jugo de la caña de azúcar mediante prensado en molinos de rodillos que suele ir precedido de un fragmentador de la caña. En la primera molienda se libera el 60% del jugo de la planta y el 70% de la sacarosa. La repetición reiterada de la operación proporciona rendimientos finales del orden del 93-97,5%. Básicamente, ésta es la principal diferencia en el proceso de obtención de azúcar a partir de la caña con respecto a la remolacha. El resto del procesado es básicamente el mismo.

El cultivo de la caña de azúcar permite obtener, además de azúcar, una amplia cantidad de derivados y subproductos como se muestra a continuación.

4.6.3. Obtención de papel y cartón a partir de subproductos vegetales

La obtención de pulpa y papel a partir de bagazo constituye una alternativa ecológica de empleo de este residuo de la producción de azúcar y que en la actualidad representa el 75% del bagazo industrializado del mundo, cuyas posibilidades se ilustran en la Tabla 8.29.

Tabla 8.29. Posibilidades de producción de pulpa y papel a partir de bagazo

Tipo de pulpa	Producto
Química	Papel de imprenta y escribir, cartulina, cartón. Papel para sacos y envolver.
Semiquímica	Papel para sacos y envolver, cartoncillo.
Química-mecánica y mecánica	Papel de imprenta y escribir, papel periódico.
Pulpa absorbente	Pañales infantiles desechables, almohadillas sanitarias.

4.6.4. Tableros aglomerados

El desarrollo de las tecnologías para la producción de tableros aglomerados, responde a la necesidad de incrementar los niveles de aprovechamiento de las explotaciones forestales, las cuales representan pérdidas en términos de reducción del área de bosques, así como a la necesidad de utilizar las ramas o los desechos que aparecen durante la explotación y la elaboración de la madera en los aserraderos en forma de astillas y recortes.

En el caso de los tableros aglomerados de bagazo, tiene como antecedente la experiencia acumulada en la fabricación de paneles de fibras, elementos moldeados y otros tipos de paneles, cuyas principales aplicaciones son: paneles ligeros para divisiones interiores, puertas interiores, armarios y estantes de cocina, revestimiento de paredes, encofrado, etc., pudiendo señalarse, que el empleo de paneles aglomerados de bagazo compite ventajosamente desde el punto de vista económico (reducción del tiempo de ejecución), ecológico (reducción en la emisión de CO_2 debido a la disminución en el consumo de cemento) y el incremento en la flexibilidad de la utilización del espacio al permitir reajustes a través de la sustitución de paredes interiores de viviendas, lo que constituye una alternativa ventajosa para el empleo del bagazo excedente de la producción de azúcar.

4.6.5. Alimento animal

La búsqueda de plantas y sistemas para maximizar la captación de energía solar y la conversión en biomasa es una aplicación ventajosa de los residuos agrícolas e industriales en general, cuyos componentes pueden usarse eficientemente en la alimentación animal, a partir de la sustitución de concentrados y mediante raciones que permitan obtener una respuesta adecuada del animal con un bajo costo.

El potencial básico de los alimentos brindados por la industria azucarera puede dividirse en dos categorías, atendiendo al tipo de fuente alimenticia que lo proporciona: proteínas (levadura torula a partir de mieles finales, mostos alcohólicos y mieles hidrolíticas) y carbohidratos (caña integral, mieles finales, mieles integrales y/o invertidas, pienso miel-urea-bagacillo, bagazo o meollo predigerido, Residuos Agrícolas de la Cosecha (RAC)).

4.6.6. Mieles y alcoholes

Otra producción muy atractiva a partir de la caña de azúcar es la obtención de alcohol a partir de las mieles finales del proceso de producción de azúcar, debido a la elevada productividad que puede obtenerse en comparación con otros cultivos.

Sin embargo, el rendimiento de las mieles varía de acuerdo a varios factores: variedad de caña, época de cultivo, condiciones ambientales propias del país y factores de la industria azucarera y se encuentran entre el 30-35% de miel final por unidad de azúcar producido. Es importante señalar el sostenido crecimiento que está teniendo la producción de alcohol en los países desarrollados como Francia y EE UU, lo

cual ratifica la tendencia a depender cada vez menos de los combustibles fósiles y el cambio en la estructura de la demanda de materias primas para la obtención de energía.

4.7. INDUSTRIA DE PRODUCCIÓN DE AGROQUÍMICOS

La industria agrícola genera productos básicos, como vegetales, carne o fruta, además de ser fuente de materias primas de otras industrias: papelera, maderera, química. De ahí que tradicionalmente se haya apoyado en la industria química para que le proporcione unos compuestos, los genéricamente denominados fitosanitarios, que ayudan a la producción de las cosechas pero generan en contrapartida problemas ambientales.

Difiere de la mayoría de industrias en que sus procesos de producción son estrictamente controlados mediante sistemas biológicos y medioambientales. Cabe indicar que las actividades agrícolas influyen y controlan los ciclos naturales.

A lo largo de las últimas décadas se ha producido un avance en los métodos empleados en la agricultura. Las innovaciones principales han sido el arado en curvas de nivel, la rotación científica de cultivos y el uso de fertilizantes y pesticidas (Por no citar los alimentos modificados genéticamente).

4.7.1. Herbicidas

Aplicados directamente sobre las plantas. Su permanencia en el suelo depende del tipo de herbicida. Los herbicidas, por su método de aplicación, pueden ser preventivos o correctivos. Aunque también se clasifican en selectivos (por ejemplo, los que sólo eliminan pastos) y no selectivos. Algunos ejemplos de herbicidas son: clorato de sodio, sulfamato de amonio, arsenito de sodio, 2,4-D (ácido 2,4-diclorofenoxiacético), etc.

4.7.2. Insecticidas

Son agentes que se encargan de la destrucción de insectos y se clasifican por su forma de acción. Los venenos estomacales son letales para los insectos que los ingieren; los insecticidas por contacto matan por un simple roce corporal; los fumigantes actúan sobre el sistema respiratorio de los insectos. El objetivo sanitario es reducir su empleo, bajar su costo y aumentar su efectividad. Algunos de los insecticidas más conocidos son: DDT, heptacloro, sulfato de nicotina, p-diclorobenceno, cianuro de hidrógeno, bromuro de metilo y dicloruro de etileno.

4.7.3. Fungicidas

Comprenden agentes contra hongos y conservadores de madera. Actúan por contacto directo, y con frecuencia dañan las plantas. Debido a que el ciclo reproductivo de los hongos es muy corto, ocurren cambios genéticos muy rápidos, lo que obliga a cambiar frecuentemente los agentes de tratamiento. Los más conocidos son: ditiocarbamato de etileno, pentacloronitrobenceno, 6-azauracil, etc.

4.7.4. Rodenticidas

Actúan contra las plagas de roedores (ratas, ratones, ardillas, etc.), ya que tienen la capacidad de dañar grandes extensiones y diseminar enfermedades. Algunos de los rodenticidas más conocidos son: fosfuro de zinc, sulfato de talio, monofluoroacetato de sodio, estricnina,

4.7.5. Biocidas

Se aplican para eliminar microrganismos (bacterias, virus, etc.). Algunos ejemplos son: creosota de alquitrán, 1,2-dibromo-2,4-dicianobutano, pentaclorofenol, etc. El uso de agentes con mercurio está prohibido.

5. Impacto ambiental en la industria de la piel

En el Capítulo 3 se lleva a cabo una amplia descripción de la industria de la curtición desde la óptica de las nuevas tecnologías para la minimización de los residuos, mientras que en el presente se incide más en el impacto ambiental como grupo de empresas y se complementan algunos aspectos.

En el año 2000 en Europa se contaban un total de 2.866 empresas curtidoras (3.127 en 1997) que empleaban a un total de 54.565 trabajadores. El volumen de negocio alcanzado por estas empresas en el año 2000 fue de casi 9.600 millones de euros. La media de trabajadores en Europa es de 19 empleados

por empresa, y el volumen de negocio medio es de 3,34 millones de euros por empresa.

Hay una alta concentración de estas empresas teniendo en cuenta que el 83,7% de ellas se localizan en Italia y emplean al 55,5% de los trabajadores europeos. Italia representa el 65,7% del total de volumen de negocio, destacando como líder en la industria de curtidos europea. España es el segundo país en importancia dentro de esta industria, pero se sitúa a gran distancia de Italia. En España se ubica el 7,8% de las empresas europeas, que dan empleo al 13,6% de los trabajadores europeos y que aportan un volumen de negocio del 13,4%.

La industria de curtidos en España se localiza principalmente en el área mediterránea. En el año 2001 en Cataluña, Comunidad Valenciana y Murcia se concentraban más del 80% de las fábricas y del 85% de los trabajadores. En cuanto al tamaño de las industrias, el 80% tienen 50 o menos trabajadores, mientras que solamente el 7,5% contaban con más de 100 trabajadores.

Por lo que se refiere a la producción se observa que en el periodo 1994-2001 ésta se ha ido manteniendo entre los 45 y 50 millones de metros cuadrados de piel curtida. Se considera que aproximadamente el 70% de la producción es de piel vacuna y el 30% de piel pequeña (principalmente piel de ovino). En cuanto a exportaciones hubo un descenso entre los años 1997 y 1999 debido a la caída en exportaciones a países asiáticos, pero posteriormente se ha recuperado debido fundamentalmente al incremento de las exportaciones a países de la Unión Europea.

La industria de la piel consume una gran cantidad de energía: más del 40% en el secado, un 37% en acabados y un 13% en lustrado y curtido.

El proceso que se aplica en la industria de la piel depende de la materia prima de partida, del estado de las pieles a su recepción y del producto que se quiere obtener. Las operaciones se pueden agrupar en las siguientes etapas: ribera, curtición o adobado, tintura y acabado.

Existen dos formas de adobar las pieles:

a) *Método vegetal.* Se lleva a cabo con taninos, que es una sustancia natural biodegradable. Da como resultado una piel menos suave que la obtenida por el procedimiento químico. La preparación de pieles requiere entre 2 y 4 meses.
b) *Método mineral.* Mediante cromo trivalente. En este caso el curtido requiere únicamente entre 1 y 3 semanas. El gran inconveniente es el elevado consumo de agua y la contaminación generada.

El proceso de curtición se enfrenta a diversos problemas medioambientales:

- La piel es una materia perecedera, que se degrada rápidamente generando malos olores e infecciones.
- Para evitar la putrefacción se añade sal. El desalado posterior provoca un gran consumo de agua y una elevada concentración de sal en los efluentes. Una alternativa es la conservación en frío, aunque es una técnica cara.
- Después de desalar la piel hay que extraer la grasa, que será utilizada para fabricar productos cosméticos.
- El cromo (III) resulta imprescindible para endurecer la piel, pero repercute negativamente en los fangos de las aguas residuales. El límite legal está establecido en 3 mg de cromo en un litro de agua, mientras que las aguas procedentes de este tipo de industrias contienen entre 300 y 500 mg por litro.
- El pelo de vacuno es un grave problema. Se distinguen dos métodos para eliminarlo:

  1. Los *procesos tradicionales*, que lo eliminan después de una operación de remojo mediante un ataque químico con baños alcalinos en presencia de Na_2S. De esta forma se elimina el pelo, que queda suspendido en el agua residual.
  2. Las *nuevas tecnologías*, que permiten obtener una piel más fina y regular. Además, el pelo podrá ser utilizado como abono agrícola de gran calidad tras pasar por la planta de tratamiento. En este caso se distinguen las siguientes etapas:

     a) Inmunización del pelo con NaOH o $Ca(OH)_2$ durante una hora aproximadamente.
     b) A continuación se añade Na_2S o NaSH y se procede a un afeitado químico del pelo.
     c) Se filtra el baño, separando el pelo en forma sólida.
     d) Se lava el pelo para disminuir la concentración de sales.
     e) Se añade Na_2S para destruir los restos de pelo de la piel.

Por lo que hace referencia al consumo de agua, son válidas, para el tratamiento de las pieles de ovino, las siguientes cantidades:

- Proceso de ribera: 170 l/ piel
- Lavado de lana: 30 l/kg piel
- Desengrase: 80 l/piel
- Curtido: 40 l/piel
- Tintura: 60 l/piel

Desde el punto de vista de las EDAR, hay que pensar que después de la depuradora específica de la industria, las aguas se vierten a cauce público y, por tanto a la EDAR urbana, el principal problema es la salinidad. La sal se usa para la conservación y no se puede eliminar. Por tanto, las técnicas ambientales alternativas recomendadas serían:

- Usar las pieles así que salen del matadero (se estima que el período de tiempo máximo es de 8 horas desde que se extrae del animal hasta que se debe iniciar el proceso de tratamiento).
- Emplear otras técnicas para el mantenimiento de las pieles en condiciones, como el frío.

En cualquier caso lo importante es evitar el salado de las pieles.

5.1. PROCESOS INDUSTRIALES PARA EL CURTIDO DE LA PIEL

En líneas muy generales los esquemas de las Figuras 8.35 y 8.36 muestran los procesos de curtición tradicional y otro más novedoso.

5.1.1. Proceso tradicional

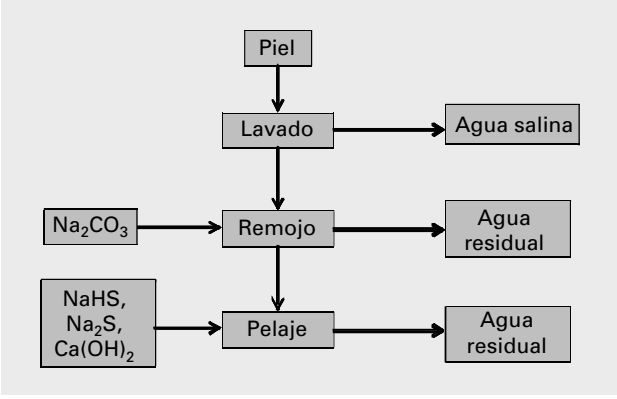


Figura 8.35. Diagrama de curtido del proceso tradicional.

5.1.2. Proceso nuevo

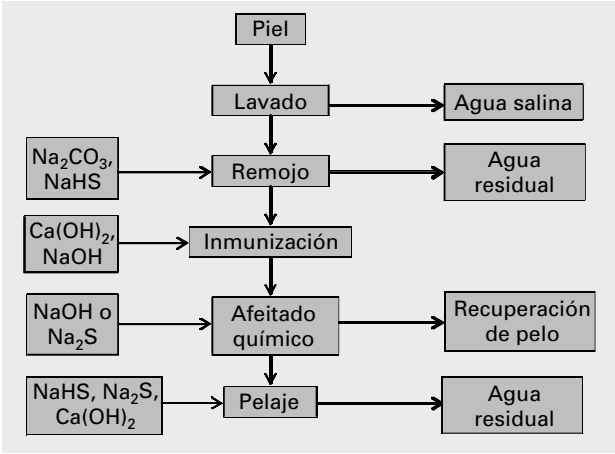


Figura 8.36. Diagrama del proceso nuevo para el tratamiento de la piel.

5.2. PROCESO DE RIBERA

La sección de ribera es el conjunto de operaciones mecánicas y procesos químicos cuyo objetivo es eliminar los componentes inútiles para obtener el cuero (epidermis y pelo), y preparar la estructura fibrosa de la piel para facilitar su curtición. Un cuero de calidad implica unos buenos trabajos de ribera, y en ellos hay que buscar las causas y origen de muchos de los defectos del cuero acabado.

El proceso de ribera, como muestra la Figura 8.37, consta de las siguientes etapas:

a) *Remojo.* Consiste en un primer lavado de las pieles para *rehidratar las fibras*, eliminar la sal y los compuestos orgánicos indeseables, y dotarla del grado de humedad necesario. Pueden añadirse biocidas para evitar la degradación producida por microorganismos.

b) *Deslanado.* Consiste en un tratamiento químico o enzimático con el objetivo de destruir las queratinas y debilitar la raíz del pelo. Las pieles se hinchan, y son resbaladizas, conociéndose como piel en tripa. Es aconsejable trabajar a temperaturas inferiores a 40 ℃ para no desnaturalizar la piel. Los productos químicos más utilizados son: Na_2S y $Ca(OH)_2$. La acción de los álcalis sobre la queratina de la epidermis y del pelo consiste en la rotura del puente disulfuro de la cistina. También se pueden utilizar baños de enzimas que atacan selectivamente la raíz del pelo para facilitar su posterior recuperación. Esta etapa finaliza con un lavado de agua.

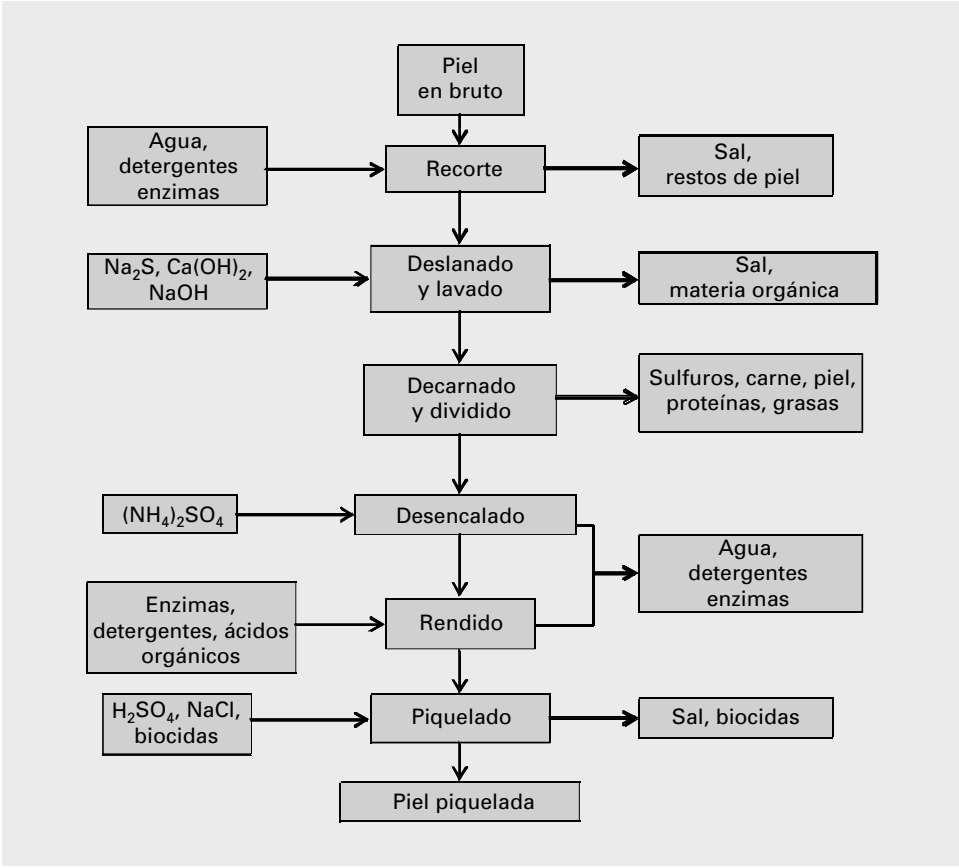


Figura 8.37. Diagrama del proceso de ribera.

c) *Descarnado.* Es una operación que consiste en la eliminación mecánica del tejido subcutáneo y adiposo de la piel.
d) *Dividido.* La piel descarnada se recorta y se pasa por la máquina de dividir. Una cinta sinfín afilada se encarga de cortar la piel al grueso deseado del artículo. La cuchilla horizontal divide en dos la pieza: parte superior (flor) con grosor igualado y parte inferior (carne) de un grueso irregular.
e) *Desencalado.* Es una operación que consiste en la eliminación de la cal (que se ha incorporado mecánicamente y ha sido absorbida por los capilares) mediante reacción con $(NH_4)_2SO_4$ y transformación en sales solubles ($CaCl_2$). La acción de los ácidos reduce el hinchamiento alcalino de la piel, pues se reduce la atracción electrostática y salen los iones por los espacios interfibrilares.
f) *Rendido.* En esta etapa se somete el material a un baño con enzimas, ácidos orgánicos y detergentes para eliminar los restos orgánicos que puedan quedar después de los procesos anteriores. Se suaviza la piel, se abre la estructura fibrosa y mejora su tacto final. Esta operación finaliza con un lavado de agua.
g) *Piquelado.* Es una operación de pre-adobado que consiste en preparar la piel para la posterior curtición al cromo o con extractos vegetales. Consta de un baño de la piel con ácidos y sales con un reposo posterior prolongado de la piel para evitar su hinchamiento.

5.3. CUEROS Y PIELES

La industria del curtido es considerada como muy contaminante pero al mismo tiempo es el sustento para una numerosa mano de obra en todo el mundo y suministra una serie de elementos útiles para el consumo.

El curtido convierte las pieles de diversos animales en cuero. El método más corriente es el que utiliza cromo, aunque existen otras formas de curtir tales como utilizar taninos orgánicos. El proceso más completo incluye las etapas de almacenaje de las pieles crudas, preprocesado de las pieles, curtido, secado, acabado y almacenaje del producto. El esquema de la Figura 8.38 expone el principio.

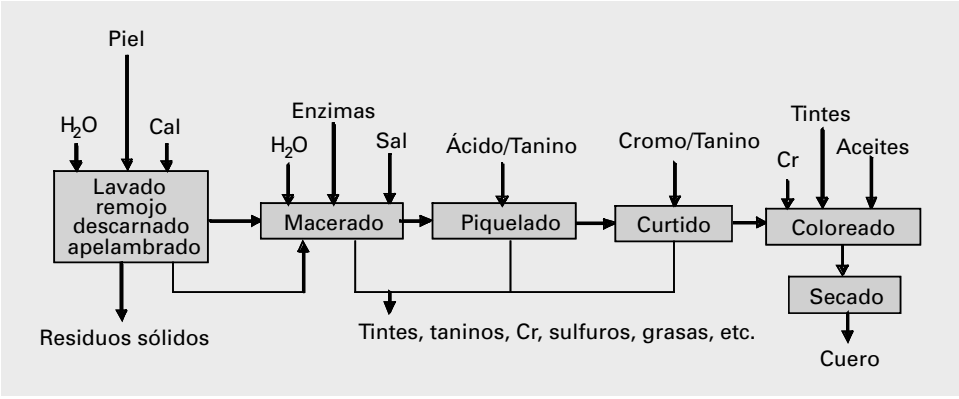


Figura 8.38. Procesos del curtido de la piel.

5.3.1. El curtido

Las pieles sometidas a los trabajos de ribera aún son putrescibles, no resisten al calor, y si se secan adquieren un tacto duro. La curtición consigue eliminar estas deficiencias, y al material obtenido se le conoce como cuero.

Este proceso consta de las siguientes etapas:

a) *Desengrasado.* Esta operación tiene la finalidad de eliminar la grasa natural de la piel, mediante disolventes y tensoactivos. Puede realizarse en húmedo (con humectantes o con disolventes de grasas) o en seco. Tradicionalmente se ha empleado petróleo, aunque este método está prohibido en la actualidad. Si la relación entre la parte hidrofílica y lipofílica del tensoactivo es pequeña, su solubilidad en la grasa aumenta. Disminuye la tensión superficial del agua, y se coloca alrededor de las partículas emulsionadas para permitir que las partículas estén en solución sin que se produzca una separación rápida de las dos fases.

b) *Pre-adobado.* Esta operación puede hacerse durante el piquelado. Generalmente se utilizan sales y ácidos, aunque también extractos vegetales y aldehídos.

c) *Adobado.* Es una reacción donde se producen uniones transversales entre las fibras de la piel de colágeno (-COO) y el curtiente, lo que estabiliza su estructura y le confiere la durabilidad necesaria. El adobado puede ser mineral o vegetal.

d) *Adobado mineral.* La curtición al cromo se realiza sobre pieles piqueladas, siendo relativamente fácil curtir la piel. Consiste en un baño con sales metálicas, junto con ácido brómico, bicarbonato sódico, biocidas y aceites. Generalmente se emplean baños cortos con agitación vigorosa. Las pieles curtidas al cromo resisten a la temperatura de ebullición del agua sin contraerse, mientras que el cuero curtido con extractos vegetales resiste a unos 70 ℃. Presentan una estructura fibrosa de gran resistencia a la tracción y al desgarro, al mismo tiempo que son suaves y flexibles.

e) *Adobado vegetal.* Es el producto de la oxidación del polifenol que permite una curtición homogénea en todo el grosor de la piel. Es una operación igual que la anterior pero en lugar de sales metálicas se utilizan taninos vegetales, y aldehídos y quinonas en menor proporción. Para curtir la piel, la solución curtiente debe penetrar hacia su interior y las fibras estar en condiciones para poder reaccionar con el tanino. En el cuero seco, sólo una parte del tanino está combinada con la fibra de la piel, y el resto está depositado entre las fibras de una forma puramente física. Si se utiliza un adobado de este tipo no es necesario ni el piquelado ni el desengrasado.

f) *Escurrido.* Tiene lugar en una máquina centrífuga o hidráulica, hasta eliminar un 50% de agua aproximadamente. El cuero curtido reposa 24 horas y se escurre en una máquina hidráulica. Consta de dos cilindros entre los que se hace pasar el cuero.

g) *Rebajado.* Esta operación mecánica sirve para igualar el espesor de piel curtida. El cuero se presenta al cilindro de cuchillas afiladas sobre un cilindro metálico liso con el lado de carne hacia arriba. El exceso de grueso se elimina en forma de virutas.

La Figura 8.39 muestra el proceso de adobado de la piel.

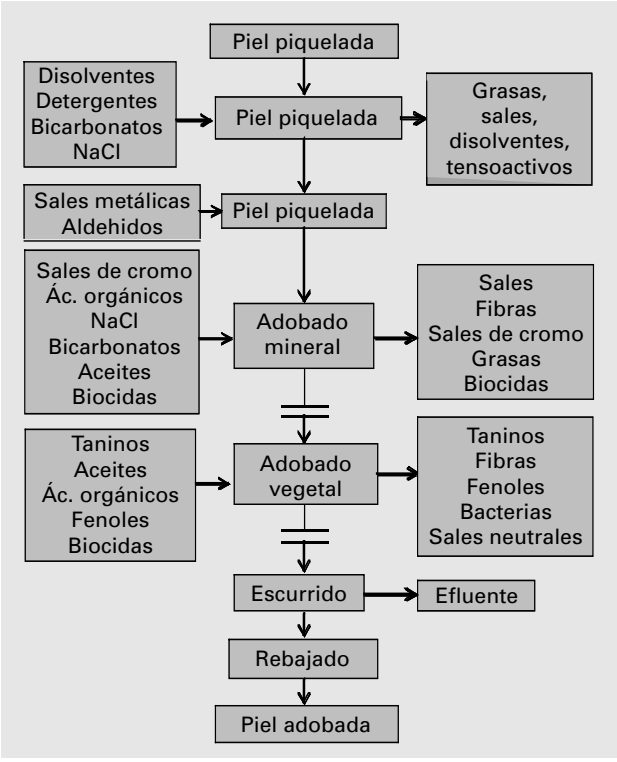


Figura 8.39. Proceso de adobado de la piel.

5.3.2. La tintura

Durante este proceso se proporciona a la piel curtida un color distinto al de la propia curtición. Esta operación se realiza en húmedo dentro de un bombo rápido para obtener una buena agitación. La cantidad de colorante utilizado dependerá del grosor de la piel y del tipo de tintura a realizar. Consta de las siguientes etapas:

a) *Neutralización.* En esta etapa se somete al material a un lavado previo y posterior con agua. Consta de un baño con bicarbonato sódico y formiato sódico para corregir el pH de la piel.
b) *Readobado.* Esta operación consiste en un curtido de la piel con agentes adobantes minerales o vegetales, sin cloruro sódico y en caliente, con el objetivo de compactar la piel.
c) *Tintura.* Es una etapa consistente en dar color a la piel utilizando un colorante, que puede ser: ácido, básico, oxidante, complejo metálico, etc., dependiendo de las características requeridas. La mezcla más utilizada está compuesta de: amoníaco + colorante + ácido fórmico.
d) *Engrasado.* El objetivo de esta operación es devolver a la piel la suavidad y la protección que ha perdido en los procesos anteriores mediante lanolinas, aceites y grasas. También se suelen añadir emulsionantes, sulfato de magnesio y fungicidas.

La Figura 8.40 muestra el esquema de la tintura de la piel.

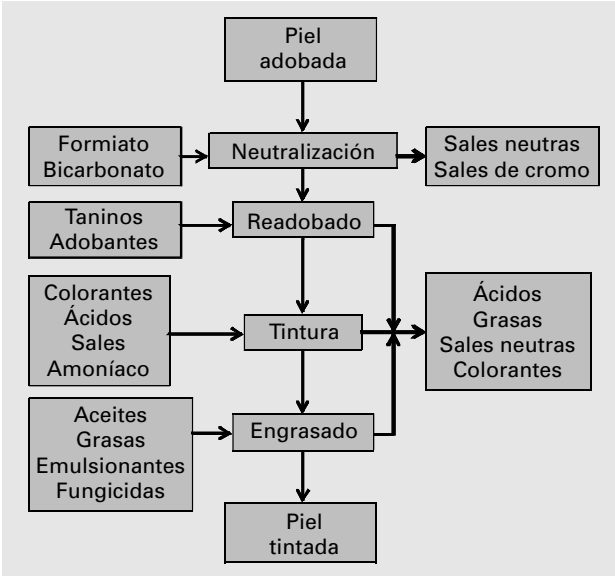


Figura 8.40. Proceso de tintura de la piel.

5.3.3. El acabado

Para comercializar los diferentes tipos de pieles curtidas secas, se someten a operaciones mecánicas y de aplicación de acabados. Las pieles secas se acondicionan para ablandarse y se secan por segunda vez para que queden planas. Las operaciones de acabado son los tratamientos superficiales que se aplican a las pieles para mejorar su aspecto. El acabado del cuero es la fase más compleja y menos científica de la fabricación. Este proceso consta de las siguientes etapas:

a) *Acondicionado.* En esta etapa se unen entre sí las fibras, consiguiendo un cuero duro.
b) *Ablandado.* El objetivo de este paso es obtener una piel más flexible. Consiste en doblar y estirar la piel hasta llegar a separar las fibras unidas.
c) *Escurrido.* Esta operación consiste en un secado mecánico de la piel.
d) *Pinzado y secado final.* En esta etapa se elimina la humedad de la piel ablandada, clavando la piel sobre un tablero y dejándola secar al aire, o en un secadero.

e) *Mecanizado.* Consiste en realizar una serie de operaciones mecánicas sobre la piel con el objetivo de darle una máxima superficie, además del tacto, el relieve y la flexibilidad deseada. Se elimina cualquier parte arrugada o con defectos, además de proporcionar a la piel una mejor presentación y facilitar el trabajo a posteriori. Entre las operaciones de mecanizado destacan: recortado, clasificado, esmerilado, desempolvado, etc. El esmerilado consiste en frotar el lado de flor o el de la carne con papel de esmeril. Para eliminar el polvo de la piel existen dos tipos de máquinas: las de cepillo y las que utilizan aire comprimido.

f) *Aplicación de productos.* Esta operación consiste en dar a la superficie de la piel el color y el brillo deseados mediante la aplicación de pigmentos, resinas, ceras, colorantes, lacas, etc.

La Figura 8.41 muestra el proceso de acabado de la piel.

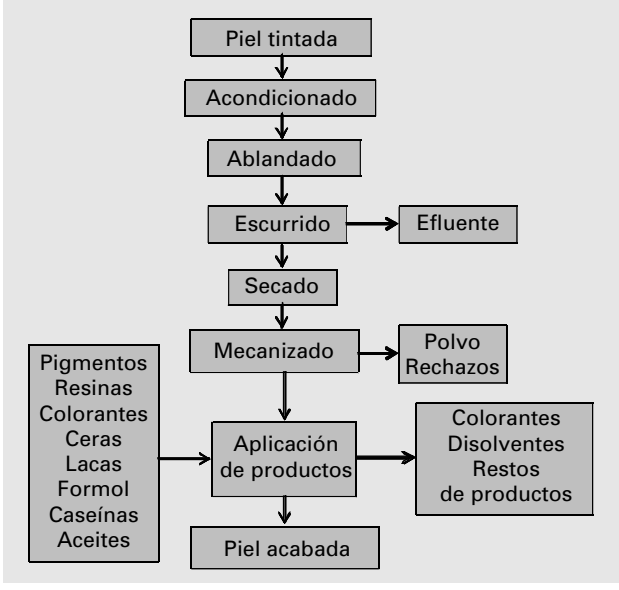


Figura 8.41. Proceso de acabado de la piel.

5.4. RESIDUOS DE LA INDUSTRIA DEL CUERO

Los residuos generados en esta industria pueden clasificarse en:

5.4.1. Residuos líquidos

El consumo de agua en todas las etapas de la curtición es muy elevado y en algunos casos no se puede reaprovechar el recurso en un ciclo cerrado de transformación debido a la elevada carga contaminante que arrastra de una etapa a otra. Las aguas residuales se van cargando con proteínas solubles liberadas por los cueros y con remanentes químicos de los productos utilizados, que afectan el medio ambiente de distinta forma:

- Proteínas y sustancias orgánicas, tales como taninos sintéticos y vegetales, aceites y grasas y otras sustancias que consumen oxígeno del medio donde son descargadas. Esta contaminación orgánica es expresada como DBO y DQO; si esta demanda de oxígeno es muy elevada puede provocar alteraciones a la fauna y flora del medio receptor. Afortunadamente estas sustancias orgánicas son relativamente fáciles de degradar biológicamente, por lo que técnicamente no hay problemas para reducir los valores de DBO y DQO a niveles aceptables antes de su descarga.
- Sulfuros que son potencialmente tóxicos por la posibilidad de generar sulfuro de hidrógeno a un pH bajo. Existen alternativas para bajar el contenido de los mismos a través de recirculación de baños o sistemas de pelambre con bajo sulfuro. También existe la posibilidad de oxidar fácilmente los sulfuros durante el tratamiento de las aguas mediante el uso de aireadores. La eliminación del sulfuro en las aguas residuales no representa un problema desde el punto de vista tecnológico.
- El cromo trivalente, utilizado en curtiembres dentro de ciertos límites, no es soluble y sus efectos sobre el medio ambiente son limitados. El principal problema reside en la posibilidad de transformación de éste en cromo hexavalente por oxidación. El cromo hexavalente es mucho más móvil y tóxico. El cromo trivalente, que es utilizado en curtiembres, se convierte en hidróxidos insolubles en el agua y estas sales envejecen y se vuelven cada vez menos solubles, permaneciendo sólo una pequeñísima parte en solución. Además, sólo una pequeña parte de sales de cromo trivalente puede ser absorbida por las plantas, por lo que el cromo no puede acumularse en la cadena alimentaria. Sin embargo, la tendencia general ha sido la de restringir cada vez más su uso teniendo en cuenta el riesgo de oxidación a cromo hexavalente. La inquietud principal es que si bien se conocen los efectos del cromo a corto plazo, es muy difícil prever las consecuencias en un mediano y largo plazo.

- Los cloruros y sulfatos, aunque son productos químicos relativamente inofensivos, están volviéndose cada vez más problemáticos para las curtiembres porque las cantidades que se descargan en el medio y el hecho de que es extremadamente costosa su remoción causan serios problemas en forma de salinización de aguas superficiales.
- El nitrógeno causa problemas cuando se detecta la presencia de nitratos en el agua potable. Si bien la industria del cuero es responsable sólo de una pequeña cantidad de nitrógeno eliminado, en forma amoniacal o de nitrato, es posible que se restrinja cada vez más su uso.

5.4.2. Residuos sólidos

- Residuos provenientes del cuero fresco (recortes) y de cuero en tripa. Los recortes de cuero crudo son un riesgo desde el punto de vista ecológico para las curtiembres, ya que constituye un elemento que entra rápidamente en putrefacción y que no puede ser procesado ni aprovechado por la curtiembre. Los recortes de cuero en tripa son comercializables, por lo que en principio no representan un problema de gestión de residuos.
- Los residuos sólidos cromados son los provenientes de recortes y rebajaduras de cuero curtido y el lodo proveniente de las plantas de tratamiento de aguas residuales. La mayor parte de los residuos sólidos tienen un contenido de cromo tan elevado que son considerados tóxicos y deben descargar únicamente en sitios especialmente destinados a tales efectos.

5.4.3. Emisiones atmosféricas

En la industria de curtiembres las emisiones gaseosas pueden clasificarse en dos grupos: olores y vapores de disolventes provenientes de las operaciones de acabado.

Los malos olores provienen de un pobre control de las operaciones anteriores a la operación de curtido, por: un control deficiente de la limpieza de equipos y recipientes, de los canales de drenaje, pozos de sedimentación y residuos acumulados en algún lugar, producto de la descomposición orgánica. La disminución de los malos olores es solo cuestión de un buen mantenimiento operacional, más que de la tecnología en uso.

Por otro lado, los vapores de disolventes usados en la etapa de acabado de cueros dependen del tipo de producto químico empleado y de las medidas implementadas para reducir su emisión.

En las emisiones atmosféricas pueden identificarse el sulfuro de hidrógeno y otros compuestos sulfurados, amoníaco y disolventes que se emiten en los acabados.

5.4.4. Mejores técnicas disponibles para los residuos de curtición

Durante el proceso de curtición se generan gran cantidad de residuos cuyas características pueden ser muy diferentes. Es de vital importancia la segregación de residuos para poder asegurar un tratamiento posterior adecuado.

También hay que manipularlos de forma que no produzcan malos olores ni emisiones al aire. Siempre que sea posible hay que intentar la valorización o la comercialización de los residuos como subproductos.

En la Tabla 8.30 se muestran algunos de los residuos que se generan y su posible utilización.

Tabla 8.30. Residuos de la curtición de piel y su posible utilización

Residuo	Reutilización, reciclado, recuperación y tratamientos MTD
Sal	Materia auxiliar para industria de fundición de aluminio.
Serrajes	Producción de cueros, producción de cuero regenerado, marroquinería, piezas de pieles pequeñas, proteína hidrolizada, gelatina y cola.
Serrajes sin curtir	Colágeno, proteína hidrolizada, cubiertas para embutidos y tripa artificial.
Carnazas	Recuperación de grasa, cola y proteína hidrolizada.
Recortes de piel en bruto	Recuperación de grasa y cola.
Rebajaduras	Producción de cuero regenerado, cola y proteína hidrolizada.
Recortes curtidos	Producción de cuero regenerado, piezas de piel pequeñas y marroquinería.
Pelo y lana	Proteína hidrolizada, material para relleno de tierras, lana, compostaje y fertilizantes para agricultura.
Polvo esmerilado	Vertedero.
Grasas y aceites	Compostaje, tratamiento térmico.
Disolventes	Recuperación.
Envases, contenedores, palets, plástico, papel, cartón, etc.	Reciclaje.
Residuos depuración de aire	Regeneración de los filtros de carbón.
Fangos de depuradora	Fertilizantes para agricultura y compostaje (cuando el contenido en cromo es suficientemente bajo: inferior a 750 mg Cr/kg de materia seca). Valorización energética.

6. La industria textil

La industria textil parte de una mezcla muy heterogénea de fibras, productos textiles y productos finales. Los tipos principales de fibra son el algodón, la lana y las fibras sintéticas (a su vez muy diversas: poliéster, rayón, nylon, acrílicas...).

Como productos intermedios hay que distinguir tejidos y géneros de punto. Los productos finales van destinados al vestido, al uso doméstico y al uso semindustrial. Las fases de la producción son la generación natural o sintética de las fibras; el procesado de las fibras o hilado, la producción de telas y tricotado; el pretratamiento, tintura y/o estampado y acabado; y la fabricación del producto final por diseño, corte, confección.

La industria textil es gran consumidora de agua, por lo cual los problemas ambientales están asociados a la contaminación acuosa. También se utilizan productos químicos (colorantes, sales minerales, bases...) que juntamente con las impurezas naturales de las fibras son las fuentes principales de contaminación. Los efluentes acuosos suelen ser alcalinos, calientes, olorosos y coloreados. Los compuestos orgánicos volátiles son la principal fuente de emisiones atmosféricas, emitidas sobre todo en la operación de secado.

La problemática ambiental del algodón comienza en su cultivo debido al uso de fertilizantes y pesticidas. En el procesado de las fibras se usan aditivos y blanqueadores. Otro problema de la industria textil es la generación de polvo de algodón y las agua de enjuague contaminadas.

La lana bruta ha de ser previamente lavada con detergentes para eliminar las impurezas naturales y adquiridas. El lavado contribuye con más de la mitad de la carga orgánica de los efluentes. En general, en el teñido se utilizan colorantes ácidos y en el acabado diferentes aditivos que se detectan en los efluentes. Las aguas residuales pueden contener múltiples contaminantes tóxicos tales como cromo o fenoles.

Las medidas de producción más limpia postulan sustituir el consumo de ciertas sustancias auxiliares por otras con menos problemas; usar peróxido de hidrógeno para eliminar los restos de apresto o almidón; utilizar colorantes de reducida toxicidad; emplear tintado continuo mediante cilindros; reciclar sosa en el mercerizado; conservar el agua con lavado a contracorriente; reciclar el agua de refrigeración y acondicionamiento del aire; sustituir el colorante sulfurado mediante solución alcalina de glucosa y otros azúcares reductores; automatizar el sistema de adición de colorantes; utilizar separaciones mediante membranas para recuperar sustancias y recuperar la grasa de lavado de la lana.

La industria textil primaria está constituida por subsectores diferentes muy interrelacionados y que producen una serie de productos, desde fibras clasificadas hasta productos para el hogar. Cada subsector puede considerarse como una industria por separado aun cuando el producto que se obtiene en cada etapa de la producción constituye el principal insumo de materia prima para la siguiente. Las etapas del proceso de fabricación textil pueden comprender un procesamiento seco o húmedo.

La industria textil puede dividirse en las siguientes ocho categorías principales según la clasificación por producto terminado:

- Fibras artificiales.
- Fibras de algodón y lana.
- Tejidos planos de algodón, lana o fibras sintéticas.
- Tejidos y productos de punto.
- Fieltros y tejidos industriales.
- Moquetas.
- Productos para el hogar (por ejemplo: colchas y toallas).
- Cuerdas, sogas y bramantes.

Y según el proceso de fabricación, la industria textil puede dividirse en cuatro etapas principales:

1. Producción de la hebra.
2. Hilado, tejido y punzonado.
3. Acabado de los tejidos.
4. Fabricación de productos textiles.

Los tejidos se producen mediante los procesos de tejido plano, tejido de punto o punzonado de la fibra. En su mayor parte la hebra se envía a las plantas de hilado o tejido que producen tejidos variados, a partir de los cuales se hacen los productos textiles del mercado. Las hebras para textiles también pueden ser punzonadas en revestimientos para pisos como alfombras. La tercera etapa del proceso textil es el acabado. Los telares y tejedoras se encargan de efectuar ellos mismos el teñido o derivan los textiles a una máquina de teñido. La etapa final en el proceso de fabricación consiste en manufacturar una serie de productos a partir de las telas terminadas.

6.1. DESCRIPCIÓN DE LA MATERIA PRIMA, PROCESOS Y PRODUCTOS

La industria textil está compuesta de instalaciones dedicadas a una serie de procesos que transforman la fibra, principal materia prima de la industria, en hebras, tejidos u otros productos textiles terminados. En los Estados Unidos aproximadamente el 70% de las instalaciones realiza operaciones de fabricación que no requieren de agua de proceso y un 10% adicional utiliza sólo pequeñas cantidades de ésta. Por el contrario, el 20% de instalaciones restantes que lava la fibra de lana, que limpia y acondiciona otras fibras naturales y artificiales, y que tiñe o acaba una serie de productos textiles, por lo general requiere de grandes cantidades de agua de proceso.

6.1.1. Materias primas

Se emplea una variedad de fibras naturales y artificiales en la fabricación de textiles. Actualmente, las fibras básicas son la lana, el algodón y una serie de fibras artificiales (nylon, poliéster y rayón).

Las fibras artificiales están compuestas de dos grupos principales: las fibras sintéticas (no celulósicas) y los polímeros naturales (fibras regeneradas). Las fibras sintéticas generalmente se sintetizan a partir de monómeros simples mientras que las fibras de polímeros naturales se elaboran a partir de materias primas naturales. La mayor parte de las fibras artificiales que se producen son sintéticas, en menor cantidad están las que se producen con fibras regeneradas.

La lana y el algodón son suministrados en forma de fibra clasificada (fibra corta) mientras que las fibras sintéticas se suministran en forma de fibra clasificada o de hilos continuos. Los pasos que se requieren para prepararlas para el procesamiento dependerán del tipo de fibra.

6.1.1.1. Lana

Dependiendo de la reproducción y el hábitat de la oveja de la que se obtiene, la lana cruda puede contener de 30 a 70% de impurezas naturales y adquiridas como grasa, sales solubles (grasa de lana) y suciedad. Es necesario que esta fibra pase por el descrude antes del hilado u otro proceso. Hay una serie de plantas dentro de la industria que se dedican exclusivamente a ello.

6.1.1.2. Algodón

El algodón es una fibra cruda mucho más limpia que la lana y su preparación inicial se realiza solamente mediante operaciones en seco como apertura, separación, cardado, combinación y estiramiento para retirar la sustancia vegetal y otras impurezas así como para alinear las fibras para el hilado.

6.1.1.3. Fibras sintéticas

Las fibras sintéticas se dividen por lo general en fibras celulósicas y no celulósicas. Las fibras no celulósicas, como nylon (poliamidas), acrílicos y particularmente poliéster, se usan más ampliamente que las fibras celulósicas. Las principales fibras celulósicas son el rayón y el acetato celulósico. Las fibras sintéticas son más limpias que las fibras de algodón, lo que elimina la necesidad de aplicar los amplios procesos de preparación de la fibra en seco que se usan con el algodón, y obviamente generan más residuos.

6.2. PRINCIPALES PROCESOS EN SECO O CON POCA AGUA

Dependiendo del tipo de fibra se recurre a una serie de procesos de producción para la fabricación de los distintos productos de esta industria. En general, las operaciones de fabricado en seco o con poca agua preceden a las operaciones de procesamiento húmedo en la secuencia de fabricación.

6.2.1. Hilado

El hilado es el proceso mediante el cual la fibra se convierte en hebra o hilo. Se lleva a cabo después de la preparación inicial de la fibra y consiste en lograr la tensión y torsión de las fibras hasta obtener la hebra, la cual se enrolla en carretes, bobinas, conos u otras bases de soporte adecuadas. Este es un proceso completamente seco. Durante la fabricación de la hebra también se puede efectuar la texturización (modificación de las propiedades físicas y de superficie de la hebra por medios mecánicos o químicos).

6.2.2. Punzonado

El punzonado mecánico es el principal método para la elaboración de alfombras. Se lleva a cabo en grandes máquinas punzonadoras dispuestas en posición vertical que cuentan con cientos de agujas en hilera

horizontal. La hilera de agujas es alimentada con múltiples puntas de hebras y las agujas tiran o enlazan las hebras a través de una base o alma que puede o no ser tejida, por lo general hecha de yute o polipropileno. El alma se mueve junto con las agujas para fijar cada puntada, dando como resultado los lazos que forman el rizo de la alfombra (bucle). Si se cortan los lazos durante el proceso, la estructura se conoce como rizo cortado en lugar de rizo de lazo. El punzonado es una operación que se lleva a cabo completamente en seco.

6.2.3. Tejido de punto

El proceso mediante el cual se obtiene el tejido de punto constituye uno de los principales métodos en la fabricación textil. Prácticamente toda la línea de medias y calcetines está hecha con tejido de punto, así como una gran cantidad de piezas de tela, prendas de vestir y ropa interior. Este proceso se lleva a cabo insertando una serie de lazos de una o más hebras con base a una serie de puntos conocidos y recurriendo a maquinaria sofisticada muy veloz. Aunque éste es un proceso completamente seco, se suele aplicar aceites a la hebra para lubricarla durante las puntadas. Para eliminar estos aceites del tejido se lo somete a procesos húmedos posteriores descargando los aceites en la corriente de agua residual.

6.2.4. Tejido plano

El proceso mediante el cual se obtiene el tejido plano es el método más comúnmente utilizado en la industria textil. Los tejidos planos se emplean, a su vez, en la fabricación de una gran cantidad de productos industriales y de consumo. Este proceso se lleva a cabo en cualquiera de los distintos tipos de telares en los que se entrelazan hebras dispuestas a lo largo (urdimbre) con otras que van en ángulo recto a las primeras (tramado) pasando por encima o por debajo de éstas. Un tipo especial de telar sin lanzadera, conocido como telar de inyección de agua, usa un chorro de agua para impulsar las hebras de la urdimbre.

Con excepción de los telares de inyección de agua, este método de tejido constituye una operación en seco. Sin embargo, a fin de evitar que se rompa la hebra de la urdimbre como consecuencia de la fricción que se produce durante la operación en sí, con frecuencia es necesario agregar al procesamiento una etapa conocida como engomado, en la cual se puede generar una pequeña cantidad de agua residual.

6.2.5. Engomado

El engomado consiste en recubrir las hebras de la urdimbre con componentes de encolado con el fin de darles resistencia y suavidad, evitando así que se rompan. Se lleva a cabo sumergiendo las hebras en un recipiente que contiene el agente de encolado. Éste se deja secar en la hebra donde permanece hasta que es eliminado en operaciones posteriores en la planta de acabado. Como resultado de este proceso, el tejido plano puede contener agregados (compuestos de encolado) equivalentes a un 15% del peso del tejido. Los agentes de encolado más comunes son el almidón, el alcohol polivinílico (PVA) la carboximetilcelulosa sódica (CMC) y ácido poliacrílico (PM). El almidón tradicionalmente se asocia con el encolado del algodón. El engomado puede generar descargas ocasionales de agua residual, por lo general debido al rebose y limpieza de las artesas, rodillo y tanques de reposición de la engomadora.

6.3. OTROS PROCESOS DE FABRICACIÓN DE TEJIDOS

Existen otros dos métodos generales en la fabricación de tejidos además de los descritos anteriormente: el de fabricación de fieltros y géneros no tejidos.

Estos métodos no emplean hebras, sino que en su lugar utilizan directamente fibra para formar un velo o banda continua de fibras. Las diferencias entre los fieltros y los géneros no tejidos dependen del tipo de fibra que se utiliza y de los métodos con que se unen las fibras para formar la tela.

Tradicionalmente, el fieltro se hacía de lana y su elaboración dependía de la capacidad de las fibras de lana estructuradas de manera escalonada para adherirse naturalmente entre sí. En los últimos años se ha incrementado el uso de productos sintéticos (generalmente rayón y poliéster). Los fieltros se elaboran insertando físicamente las fibras combinando una operación mecánica, una operación química, humedad y calor.

Los géneros no tejidos se emplean para una serie de aplicaciones y a medida que la industria crece, se van descubriendo más usos. Están hechos con fibras adheridas por medio de un agente de adhesión o fundiendo fibras termoplásticas autoadhesivas. Esto da como resultado una estructura hecha a partir de un velo o maraña de fibras. Aunque son muchos los métodos utilizados para formar el velo y lograr la adhesión de las fibras, determinadas operaciones son

básicas para todos los métodos de fabricación de géneros no tejidos. En orden secuencial, dichas operaciones son las siguientes:

- Preparación de la fibra.
- Formación del velo.
- Adhesión del velo.
- Secado.
- Técnicas de acabado.

6.3.1. Procesamiento con productos adhesivos

Los procesos que emplean productos adhesivos comprenden operaciones como adhesión, laminado, revestimiento y apelusado. Lo que tienen en común estos procesos es la aplicación de adhesivo u otro revestimiento continuo a una tela o alfombra con el objeto de modificar sus propiedades originales. Estos procesos son completamente secos o utilizan una relación de agua extremadamente baja, sin embargo es posible que se produzca una descarga de químicos adhesivos y fijadores (frecuentemente compuestos de látex) o materiales de revestimiento (con frecuencia cloruro de polivinilo) como consecuencia de una aspersión excesiva, el rebose, enjuague y limpieza del equipo.

La adhesión une dos materiales textiles en forma permanente mediante la aplicación de una delgada capa de adhesivo. El proceso permite elaborar tejidos de estructuras, colores y texturas diferentes que se combinan a fin de ampliar el rendimiento, apariencia y uso. La cohesión tejido-con-tejido con frecuencia se consigue empleando un adhesivo húmedo (usualmente un compuesto acrílico de base acuosa) o espuma de uretano. En la adhesión húmeda se aplica una capa de adhesivo al revés del primer tejido, que se une con el segundo tejido pasando ambos por entre unos rodillos. El adhesivo se cura con calor para lograr una adhesión permanente. En la adhesión con espuma, se pasa una capa de espuma de uretano sobre una llama de gas para hacer que uno de sus lados se ponga pegajoso y se procede a unir la espuma y el primer tejido al pasar ambos por entre rodillos. El segundo tejido puede pegarse al otro lado de la capa de espuma repitiendo el mismo proceso.

El laminado es similar al proceso de adhesión con la salvedad de que los productos laminados están generalmente compuestos de espuma o materiales no textiles adheridos a tejidos o de gruesas capas de espuma pegadas a dos tejidos. El reforzamiento de las alfombras, elaborado para fijar las hebras e impartir estabilidad dimensional, es un proceso especializado de laminado. Se consigue adhiriendo un látex espumado o alma de yute al reverso de la alfombra. Comúnmente se emplean adhesivos de látex en ambos casos.

El revestimiento de los tejidos es un proceso adhesivo que utiliza una serie de resinas químicas y sintéticas con el fin de obtener una película continua, relativamente distinta, sobre un tejido base. El cloruro de polivinilo (PVC) es el revestimiento más común para los tejidos textiles.

El apelusado es un proceso adhesivo en el cual se aplican fibras cortadas en trozos pequeños a un patrón de adhesivo que ha sido «preestampado» sobre un tejido. De esta manera, se pueden producir áreas con diseños sobre cualquier tipo de tejido semejando bordados o aplicaciones de figuras tejidas. El proceso se lleva a cabo mediante técnicas electrostáticas o de rociado.

6.3.2. Acabado funcional

El acabado funcional hace referencia a la aplicación de un gran número de tratamientos químicos que amplían la función de un tejido al dotarlo de determinadas propiedades. Se pueden aplicar acabados especiales para lograr que un tejido no se arrugue, mantenga los pliegues, sea impermeable, resistente al fuego, a prueba de polillas, bacteriostático resistente al moho y a prueba de manchas. Si bien la variedad de químicos que se utiliza es amplia, el agua residual que se genera durante su aplicación es por lo general reducida. Los acabados con frecuencia se aplican al tejido a partir de una solución de agua. Es posible aplicar varios acabados a partir de un solo baño. La aplicación se realiza por medio de calandrias que transportan con un rodillo el acabado de una cuba a la superficie del tejido. Luego el acabado se seca y cura sobre el tejido. Las fuentes de agua residual son los depósitos utilizados para el baño y la limpieza del equipo de aplicación y de los tanques de mezclado.

Los acabados por los cuales se logra que el tejido no se arrugue o mantenga los pliegues (planchado permanente) se obtienen aplicando un tratamiento de resinas sintéticas al tejido. Las resinas son adhesivos naturales que quedan permanentemente entrelazados con las moléculas de la fibra. La durabilidad se consigue con una cura de calor y un catalizador que genera una reacción denominada polimerización. La estructura física actual del tejido se modifica y se dice que el tejido adquiere una «memoria permanente» de su estado final planchado.

La repelencia al agua se logra tratando el tejido con siliconas y otros materiales sintéticos. Si son aplicados en forma adecuada, los tratamientos de silicona pueden resistir varias lavadas en agua o en seco. Además de agua, las siliconas repelen con efectividad los fluidos grasosos.

Los acabados a prueba de polillas se aplican usualmente a la lana y otras fibras de pelo de animal. El tejido elaborado con estas fibras se impregna con compuestos químicos que hacen que deje de ser un alimento apropiado para la larva de la polilla. En estas fórmulas se emplean sustancias químicas como fluoruro de silicona y fluoruro de cromo.

La formación de moho y hongos y la podredumbre se evita mediante la aplicación de biocidas que impiden que se desarrollen. Los compuestos generalmente usados contienen fenoles clorados o sales metálicas de zinc, cobre o mercurio. También se usan aditivos higiénicos para impedir el crecimiento de bacterias. Estos aditivos evitan los olores, prolongan la vida del tejido y también combaten el moho y los hongos.

6.4. IMPACTO AMBIENTAL DE LA INDUSTRIA TEXTIL

Los sectores de actividad más significativos en la industria textil son:

a) *Carbonizado químico.* Se aplica a los tejidos con el objetivo de separar las impurezas de origen vegetal. Se realiza mediante baño con H_2SO_4 diluido.
b) *Lavado de la lana.* Consta de un prelavado con agua fría, un lavado en caliente con solución de Na_2SO_4 y detergente, y un aclarado final.
c) *Ramo del agua.* Comprende una serie de procesos cuyo objetivo es el desengrasado, blanqueo, tinte y acabado de las diversas fibras textiles naturales y artificiales, ya sea en floca, hilo o pieza.

6.4.1. Fuentes de residuos

Es importante que para cada operación de procesamiento textil se identifique cuidadosamente cada una de las fuentes de residuos. Esto se puede lograr mediante las siguientes etapas:

- Un control de inventario y un reconocimiento de los potenciales contaminantes contenidos en los productos adquiridos.
- Un análisis del proceso.

6.4.1.1. Fuentes de DBO

La DBO es una medida indirecta de la cantidad de material orgánico presente en el agua que puede ser biológicamente degradado (por microorganismos). Ya que el oxígeno disuelto se agota en el proceso de degradación del material orgánico, la cantidad de material orgánico puede expresarse en términos de la cantidad de oxígeno requerido. Como se utiliza oxígeno en un recipiente de agua que recibe residuos orgánicos, las condiciones del agua pueden volverse sépticas y generar problemas en la calidad del agua y la salud pública.

Desencolado: El desencolado de tejidos planos es el primer paso importante del procesamiento húmedo. Las colas con base en almidón tienen por lo general valores de DBO de 500.000 a 600.000 ppm; los alginatos y los almidones modificados, 100.000 a 500.00 ppm; y las colas sintéticas (PVOH, CMC, PVAc) aproximadamente 10.000 a 30.000. Además, los almidones se eliminan generalmente con enzimas cuya DBO típica es mayor a 10.000 ppm.

La eliminación de colas sintéticas se consigue usualmente con agua caliente y trazas de álcali, de modo que el sistema de eliminación en sí no contribuye normalmente al incremento de DBO. Asimismo, las colas sintéticas por lo general pueden recuperarse de las corrientes residuales. De este modo, cambiar el almidón por colas sintéticas puede reducir la DBO en esta fuente importante en más de un 90%. En una operación típica, esto constituiría aproximadamente 50% del total de la carga de DBO de la preparación de tejidos planos (más no de los tejidos de punto).

Descrude: Los procesos de descrude sirven para eliminar los aceites, ceras y otras impurezas. Esto se logra generalmente mediante la emulsificación de los aceites sintéticos y ceras o mediante la saponificación de las impurezas de origen natural (triglicéridos).

Los aceites sintéticos y ceras contienen emulsiones de bobinado, cera de parafina, aceite para el tejido de punto, aceite para el bobinado en conos y otros lubricantes. Estos materiales tienen de por sí una DBO significativa y los emulsificadores empleados para eliminarlos y suspenderlos en la preparación también contribuyen a los niveles de DBO.

Blanqueo: La DBO en las operaciones continuas de blanqueo es bastante baja, menos de 5% de la DBO total de una planta textil en un caso típico. Además, muchas fibras sintéticas y mezclas requieren de muy poco o ningún blanqueo en comparación con los tejidos y hebras de puro algodón o lana. En este sentido, en la actual práctica comercial la DBO deri-

vada de las operaciones de blanqueo no constituye un factor crítico en la producción global de DBO.

Teñido: En los procesos de teñido la cantidad y tipo de residuos producidos varían significativamente. En el presente apartado se abordan algunos detalles de los procesos de teñido por agotamiento sobre la base del reuso del baño de tinte. Los métodos de teñido continuo, incluido el teñido discontinuo con almohadillas, generalmente emplean cantidades mucho menores de productos químicos y de agua que los métodos por agotamiento.

- *Teñido continuo:* La principal fuente de DBO proveniente del teñido continuo la constituyen los químicos desaponificadores (surfactantes) y los auxiliares de teñido utilizados en el baño con almohadillas que pueden eliminarse con lavado. Además, los agentes reductores algunas veces arrojan altos valores de DBO. Debido a la naturaleza continua de estos procesos, las corrientes residuales se separan con facilidad para lograr la recuperación de calor y otras estrategias de proceso. En tanto que el residuo del teñido continuo está por lo general constituido de agua de lavado, el contenido químico es relativamente bajo en comparación con el de los residuos del desencolado y el descrude o el de los licores gastados en el teñido discontinuo. Es así como la reducción en la fuente de DBO en los procesos de teñido continuo no tiene el potencial para mejorar la situación que sí posee el teñido discontinuo.
- *Teñido discontinuo:* Los problemas con los licores de tintura gastados que presenta el teñido discontinuo son, en teoría, mucho más difíciles de manejar debido a que:

  1. Las corrientes residuales usualmente se arrojan en fosos o zanjas comunes, lo que hace difícil la separación.
  2. Las descargas discontinuas de residuos se producen a intervalos discretos, no se puede predecir un horario y cualquier restricción horaria causa graves problemas de programación.
  3. La naturaleza de los procesos y químicos utilizados varía significativamente.

6.4.1.2. Fuentes de compuestos tóxicos

Los principales componentes del agua residual son las impurezas naturales que se encuentran en las fibras naturales y los compuestos químicos agregados durante los procesos empleados para el tratamiento de fibra, hebras o tejidos. Las plantas de procesamiento textil utilizan una amplia variedad de tintes y otros compuestos químicos, incluidos los ácidos, bases, sales, agentes humectantes, tintes y otros acabados auxiliares.

Muchos de estos agentes químicos empleados en la industria textil son considerados tóxicos y peligrosos. La descarga de estas sustancias en el medio ambiente puede causar serios perjuicios a la salud y al bienestar de una comunidad expuesta o al ecosistema afectado. Estos materiales pueden crear serios peligros para la salud y enfermedades de naturaleza crónica. Las aguas superficiales y subterráneas, los suelos y el aire pueden contaminarse todos con sustancias peligrosas y tóxicas.

Los tipos de sustancias que se puede esperar predominen en las aguas residuales tóxicas de la industria textil son:

- Metales.
- Surfactantes no degradables.
- Substancias orgánicas tóxicas como fenoles, disolventes aromáticos, ácido de metileno, cloruro, percloroetileno y ácido oxálico para mencionar unos cuantos.

Metales: Las fuentes de metales que se pueden identificar de manera específica en una planta y cuya presencia es típica en las operaciones de procesamiento húmedo son:

- Oxidantes para tintes de tina y al azufre (cromo).
- Tratamiento posterior con sulfato de cobre para tintes directos.
- Catalizador de metal usado para curar resinas (zinc, aluminio).
- Acabados piroretardantes, antimanchas e impermeables.
- Géneros en crudo.
- Agentes decolorantes de tintes como el permanganato potásico, el sulfoxilato-formaldehído y el dicromato.

Surfactantes: Otro grupo de sustancias que frecuentemente contribuye a generar problemas de toxicidad acuática son los surfactantes, detergentes, emulsificadores y dispersantes. Estos se usan de manera universal en el procesamiento húmedo de textiles.

Descargas de disolventes clorados: Existen diversos mecanismos importantes que conducen a la pérdida de disolventes clorados en la industria textil, estos son por emisiones a la atmósfera, la generación de residuos y las descargas al agua.

Los solventes clorados se usan en la industria textil en la operación de descrude como agentes desengrasantes y como portadores de los tintes, convirtiéndose en residuo peligroso después de ser usados en estas operaciones. Los disolventes utilizados como portadores de los tintes contienen varios colorantes que son compuestos orgánicos complejos de naturaleza refractaria (no biodegradables) y peligrosos. Los colorantes contienen metales pesados como cromo, cobre y zinc, y sustancias orgánicas. Solamente el 50% del peso de los tintes comerciales son colorantes. El resto está constituido de material de relleno no peligroso (como azúcar) y surfactante. El colorante termina en el disolvente residual que puede ser recuperado en la planta o enviado a otro lugar para ser reciclado. Algo de los tintes gastados puede descargarse en los sistemas de tratamiento del agua.

6.4.1.3. Fuentes de alcalinidad / acidez

El control del pH efluente puede constituir un problema difícil de manejar desde el punto de vista del proceso, debido a que en muchos casos simplemente no existe sustituto para el uso del álcali o ácido. Esto implica que la reutilización, recuperación y reciclaje o tratamiento previo (igualación y/o neutralización) son algunas veces la única alternativa.

Los procesos de preparación incluyen varios pasos. El desencolado de los tejidos encolados con almidón contribuye muy poco o nada a la alcalinidad/acidez de las corrientes residuales. Otras colas sintéticas se eliminan generalmente en soluciones alcalinas. La contribución de estos procesos de desencolado puede constituir un porcentaje significativo de la alcalinidad total.

Debido a que el proceso de desencolado se lleva a cabo generalmente en forma continua, las corrientes residuales pueden neutralizarse fácilmente agregando ácido según se produzca. La reducción en la fuente implicaría minimizar la cantidad de álcali empleado: por lo general se necesita muy poco.

El descrude y blanqueo de los materiales sintéticos debe hacerse utilizando cantidades mínimas de álcali; pero el descrude del algodón requiere de grandes cantidades. Las concentraciones típicas de álcali para el descrude del algodón son 2% a 4% de solución cáustica (50% en peso) basada en el peso del tejido procesado.

Los procesos de teñido varían en cuanto a su acidez/alcalinidad dependiendo del tipo de tinte y sustrato. La práctica general para el teñido por agotamiento de las distintas clases consiste en:

- Ácido para nylon y lana: agotar a partir de baños con tintes débiles a fuertes (pH de 3 a 7), generalmente utilizando ácido fórmico, ácido acético o sal reguladora para el control del pH.
- Básico para acrílicos y copolímeros: agotar a partir de baños débiles de tintes ácidos (pH de 4 a 5), generalmente utilizando ácido acético para el control del pH.
- Directo para celulosa: agotar a partir de baños alcalinos débiles (pH aproximado a 8), generalmente utilizando sosa comercial para controlar el pH.
- Reactivo a la fibra: agotar a partir de baños neutrales con cantidades masivas de sal, causar luego una reacción agregando grandes cantidades de álcali como solución cáustica, sosa comercial, silicato y/o fosfato trisódico. El pH se encontrará típicamente sobre 10.
- Naftol para fibras celulósicas: preparar una sal diazo en un baño de ácido fuerte (pH <3), causar luego una reacción con un agente copulador naftol S. El efluente es muy ácido. Esto se aplica también a otros colores diazotados y desarrollados.
- De tina y al azufre para celulosa: típicamente agotados de manera que el afluente sea alcalino, para luego oxidarlos.
- Dispersos para fibras sintéticas: agotados a partir de soluciones ácidas débiles (pH de 4,5 a 6).
- Prácticas para mezclas de tintura que difieren de las anteriores.

6.4.1.4. Fuentes de emisión al aire

Las emisiones que van al aire emanan de varios lugares en las operaciones textiles típicas:

- Secadoras de aire caliente.
- Máquinas de teñido.
- Tanques de almacenamiento.
- Área de depósito.
- Escapes fugitivos (ventilación en general).

Un residuo importante derivado del acabado lo constituyen las emisiones al aire provenientes del secado a temperaturas elevadas y de los hornos empleados para el proceso de cura. Por lo general, éstas contienen cantidades diversas de componentes volátiles de la mezcla de acabado así como cualquier

otro residuo volátil del procesamiento anterior que haya quedado en el tejido.

Son dos los compuestos químicos emitidos básicamente en todas las operaciones textiles: ácido acético y formaldehído.

El ácido acético podría ser emitido por los tanques de almacenamiento a granel y, en menor medida, es posible que pueda provenir de las máquinas de teñido y/o secadoras. Las emisiones de los tanques de almacenamiento a granel se producirían a través de los sistemas de ventilación, y ocurriría durante el llenado y debido a pérdidas por ventilación.

El formaldehído puede ser emitido por tanques de almacenamiento de resina a granel, depósitos de tejidos acabados, secadores y hornos de cura. Las emisiones de los tanques de almacenamiento a granel pueden estar por sobre los límites traza.

6.5. PRINCIPALES PROCESOS EN LA INDUSTRIA TEXTIL

A partir de los procesos explicados en los párrafos anteriores, los apartados siguientes enfocan el problema bajo el prisma ambiental.

6.5.1. Recepción de materias primas. Preparación de hilado

En esta etapa se incluyen diversas actividades con incidencia ambiental: selección recepción y almacenamiento de materias primas, formación de hilos y tejeduría (Figura 8.42).

Tener en consideración las normas sobre almacenamiento de productos evita que se produzcan accidentes y pérdidas de material: además de la generación de residuos, aumentarían los costes asociados a su gestión.

El almacenamiento y el etiquetado incorrecto de las sustancias peligrosas que se manejan en la empresa pueden aumentar las posibilidades de contaminación y los riesgos laborales.

6.5.1.1. Mitigación del impacto ambiental

- Aprovisionamiento racional y almacenaje óptimo.
- Revisión de las materias primas antes de su almacenamiento.
- Revisión de los tanques de almacenamiento de combustible líquido.
- Evitar derrames y evaporaciones de los disolventes.

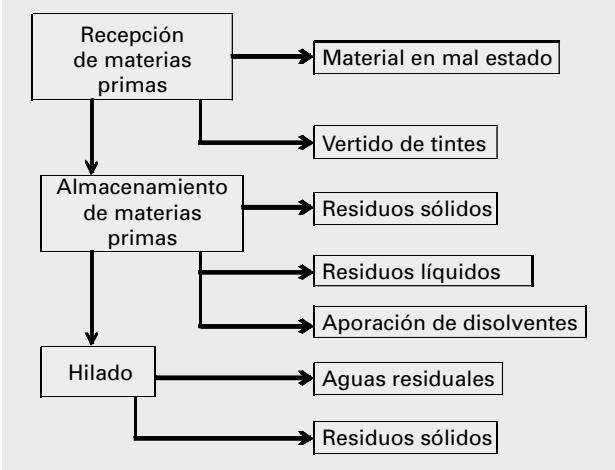


Figura 8.42. Diagrama de recepción de materias primas y preparación de hilado.

- No malgastar agua en la limpieza de los tanques.
- Utilizar materias primas que no contengan sustancias peligrosas.
- Dosificación correcta del detergente empleado en la limpieza de las telas que han de pasar al tinte.
- Implantación de sistemas de filtrado con membranas para la recirculación del agua de lavado con detergentes.

6.5.2. Tintado, acabado, confección y cosido

La Figura 8.43 resume las diversas etapas de los citados procesos, donde se puede incidir desde el punto de vista ambiental.

6.5.2.1. Mitigación del impacto ambiental

- Conviene evitar el excesivo consumo de agua en la limpieza de las cubas de los baños de tintado.

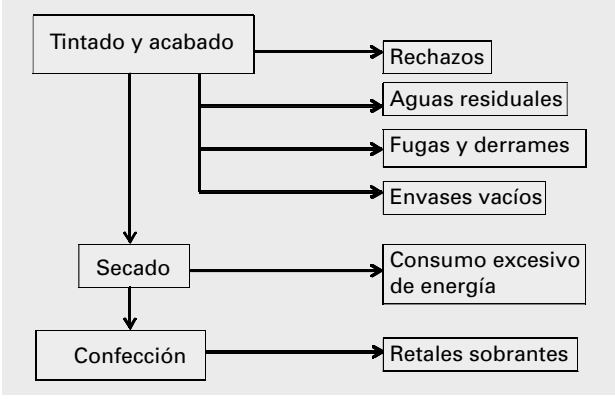


Figura 8.43. Proceso de tintado, acabado y confección.

- Secuenciar la producción de tintados desde los más claros a los más oscuros.
- Clasificar los rechazos de tintadas como telas de segunda calidad.
- En el baño se debe ajustar correctamente la cantidad de colorantes. La depuración del agua se complica al aumentar la concentración de contaminantes.
- Conviene utilizar tintas y colorantes sin efectos tóxicos para el medio ambiente.
- Reciclar los envases de plástico.
- Controlar la temperatura de la corriente para evitar excesos en el consumo de energía.
- Vender los recortes y borras de materiales textiles para emplearlos como materias primas.

6.5.3. Embalaje y almacenamiento de productos acabados

Si se consigue reducir a la mitad el papel empleado en los envases y embalajes usados en esta industria, se evitaría la tala de 60 millones de árboles cada año. Además cabe señalar que el 30% de la capacidad de los vertederos está ocupado por envases y embalajes superfluos (Figura 8.44).

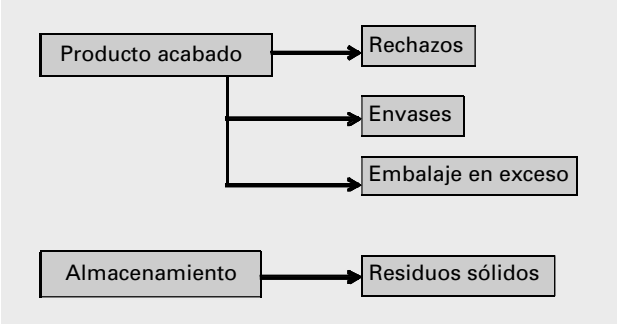


Figura 8.44. Proceso de embalaje y almacenamiento de producto acabado.

6.5.3.1. Mitigación del impacto ambiental

- Es conveniente realizar un control de calidad de los productos acabados.
- Se evitan los residuos vendiendo a terceros las piezas de menor calidad.
- Retornar los contenedores multiuso y las cisternas para tintas a los suministradores para que puedan ser reutilizados.
- Se deben llevar a cabo unas correctas operaciones de limpieza en envases antes de su reciclaje.
- Etiquetar correctamente la mercancía que contenga compuestos peligrosos.
- La eliminación de compuestos peligrosos es tarea de los gestores adecuados.
- Un embalaje excesivo, únicamente conduce a un mayor consumo de materias primas y al aumento de residuos en su lugar de destino.
- Se debe intentar la recuperación de los envases para aprovecharlos tantas veces como sea posible.
- Los resultados de un almacenamiento incorrecto son residuos innecesarios y costes asociados a su gestión.

6.5.4. Mantenimiento y limpieza de equipos

Los impactos ambientales son positivos cuando las acciones son correctas; por ejemplo, medir el consumo de agua por la sección o el tipo de máquina ayuda a racionalizar el consumo de agua. La instalación de contadores de agua por zonas de fabricación permite identificar las zonas de mayor consumo e implantar medidas correctoras: reutilización, reciclado, minimización de consumos, depuración, etc.

En cambio, cuando las actuaciones son nulas, las acciones son negativas. Este sería el ejemplo de las tuberías de abastecimiento de agua, que si no se revisan de manera conveniente pueden provocar la pérdida innecesaria de un recurso escaso e imprescindible, además de dinero.

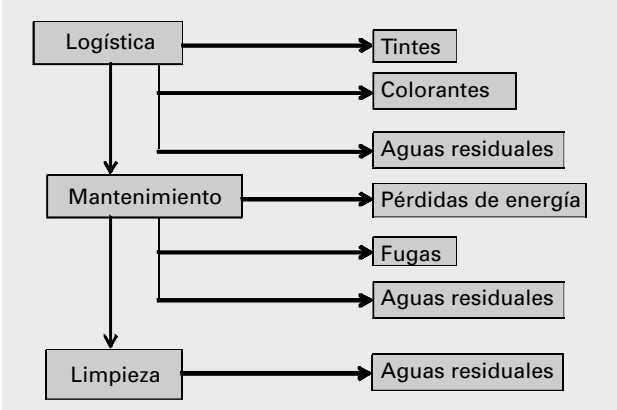


Figura 8.45. Proceso de mantenimiento y limpieza de equipos.

6.5.4.1. Mitigación del impacto ambiental

- Disponer de una planta depuradora que separe las aguas de proceso de las aguas pluviales, y reciclar las aguas residuales generadas, de forma que el vertido de la empresa sea nulo.

- Limpiar adecuadamente el fondo de los tanques de los baños de tintado.
- Es aconsejable realizar auditorías energéticas de la empresa.
- Realizar inspecciones periódicas de las tuberías, para evitar fugas y consumos excesivos.
- Verificar la eficacia, en cuanto a consumo de agua y energía, de la nueva maquinaria.
- Las fugas de vapor o de aire comprimido suponen una pérdida importante de energía.
- Implantar las medidas necesarias de forma que los efectos sobre las personas y el medio ambiente sean mínimos.

7. El impacto de las plantas de tratamiento de residuos

En este apartado se llevará a cabo una referencia a los residuos (residuos secundarios) que generan las grandes plantas de tratamiento de residuos desde la vertiente de su posible reutilización.

Algunas plantas de tratamiento de residuos como las plantas de compostaje, las de metanización, los puntos verdes, etc. producen cantidades pequeñas de residuos de diversa naturaleza que son difíciles de sistematizar en orden a un reciclaje.

En cuanto a las plantas de tratamiento de residuos en grandes cantidades (RSU, EDAR), en general producen residuos secundarios que deben ser tratados a su vez de manera particular o depositados en vertederos.

7.1. IMPACTO DE LOS VERTEDEROS

A pesar de los beneficios que su implantación representa, muchos grupos sociales se oponen firmemente a la utilización de plantas de incineración, lo que obliga a utilizar los vertederos como una de las soluciones para tratar los residuos que toda la sociedad genera. Aún así, los vertederos, el método tradicional de eliminación de vertidos, producen un impacto ambiental mayor que el de las plantas incineradoras.

Un vertedero puede entenderse como un depósito de RSU. La Ley 10/1998 de 21 de abril sobre recogida y tratamiento de residuos sólidos urbanos define un vertedero controlado como *la zona de almacenamiento de residuos sólidos urbanos sobre el terreno, dispuesta de tal forma que se eviten molestias y riesgos para la salud pública durante las operaciones de vertido, y después de su clausura*. Los vertederos controlados son compartimentos estancos donde se almacenan los residuos generados por las actividades antropogénicas. Este sistema de tratamiento de residuos sigue siendo, a pesar de los impactos ambientales que genera, una pieza clave en la gestión integral de RSU. Los vertederos presentan diferentes inconvenientes:

- Se necesitan grandes superficies de terreno.
- Suelen ubicarse alejados de las poblaciones, lo que encarece el transporte de residuos.
- Impactos visuales.
- Los residuos vertidos no se valorizan ni material ni energéticamente.
- Son rechazados sistemáticamente por las poblaciones cercanas.
- Existen pocas alternativas a la utilización del terreno recuperado.
- Debe controlarse la emisión de biogás y la generación de lixiviados.

Los vertederos funcionan como el último eslabón de la cadena de aprovechamiento de los recursos por parte de la sociedad. Para poder limitar al máximo el uso de estas instalaciones se hace necesaria una gestión adecuada de los residuos con unas tasas de reciclaje y reutilización adecuadas.

Durante el periodo de funcionamiento (y postclausura) de los vertederos se gestionan los lixiviados de acuerdo con la Directiva CE/1999/31. Los vertederos deben diseñarse con un bajo índice de permeabilidad, para prevenir la penetración de lixiviados en los terrenos. Pero las reacciones químicas en su interior pueden tener lugar incluso muchos años después de haberlos clausurado, lo que implica un peligro potencial de contaminación para los acuíferos y aguas subterráneas próximas. Para evitar la generación de lixiviados es necesario colocar en la base del vertedero una capa de drenaje de gravas o arenas de cómo mínimo 0,5 metros. Además, los lixiviados se tendrán que recoger en una balsa en el punto más bajo de la instalación, donde se tratarán *in situ* o en una planta adecuada previamente para su tratamiento.

Las condiciones anaerobias provocan que la fracción orgánica genere un gas contaminante conocido

como biogás o gas de vertedero. Este biogás es tóxico, y mezclado con la proporción adecuada de oxígeno puede ser explosivo. En los vertederos controlados es obligación captar y valorizar el biogás que se genera. En la Tabla 8.31 se muestra la composición del gas que se produce en los vertederos.

Tabla 8.31. Composición de biogás. (Fuente: Themelis, N.J.).

Componente	Porcentaje (%)
CH_4	40-60
CO_2	25-50
O_2	< 1
N_2	5
H_2	< 0,1
CO	< 0,01
Etano, propano, butano	< 0,01
Compuestos halogenados	trazas
H_2S	trazas
Organosulfuros	trazas

Como se desprende de la Tabla 8.31 los componentes mayoritarios del biogás son el CH_4 y CO_2, dos de los principales gases de efecto invernadero. Ello da una idea del impacto que generan los vertederos. Por ejemplo, cada tonelada de residuo depositado en vertederos incrementa en más de 1,3 toneladas la cantidad de CO_2 atmosférico, lo que contribuye en gran medida a aumentar el efecto del calentamiento global. Este cálculo es posible a partir de los estudios que Themelis y Franklin Associates realizaron sobre la base de diferentes vertederos en EE UU. El CH_4 emitido a la atmósfera equivale a la diferencia entre el total generado y el que se ha capturado. Asumiendo que el total de RSU vertido en EE UU es de $109 \cdot 10^6$ toneladas y que la máxima cantidad de CH_4 que se puede generar es de 62 Nm^3/t es posible calcular el volumen de metano anualmente generado:

$$CH_4 \text{ total generado} = 109 \cdot 10^6 \text{ t RSU} \cdot \cdot 62 \text{ Nm}^3/\text{t} = 6{,}76 \cdot 10^9 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4$$

La cantidad anual de biogás capturado se estima en $8 \cdot 10^9$ Nm^3. Suponiendo que este gas está formado únicamente por CH_4 (54%) y CO_2 (46%), el total de metano capturado es:

$$CH_4 \text{ capturado} = 8 \cdot 10^9 \text{ Nm}^3 \cdot 54\% = = 4{,}32 \cdot 10^9 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4$$

Por tanto, el metano emitido a la atmósfera equivale a:

$$CH_4 \text{ emitido} = CH_4 \text{ total-}CH_4 \text{ capturado}$$

$$CH_4 \text{ emitido} = 6{,}76 \cdot 10^9 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4\text{-}4{,}32 \cdot \cdot 10^9 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 = 2{,}44 \cdot 10^9 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4/\text{año}$$

Considerando que el metano tiene una volumen específico de 1,41 Nm^3/kg, en términos másicos se capturan $1{,}73 \cdot 10^6$ toneladas de CH_4. El metano tiene un potencial de calentamiento global 23 veces mayor que el del CO_2. Es decir:

$$CH_4 \text{ emitido} = 1{,}73 \cdot 10^6 \text{ t CH}_4 = = 39{,}8 \cdot 10^6 \text{ t eq de CO}_2$$

Sabiendo que el total de RSU vertido es de $109 \cdot 10^6$ toneladas, se emiten 1,06 toneladas equivalentes de CO_2 por tonelada de RSU.

Otro de los problemas es la presencia de mercurio y compuestos orgánicos volátiles. La concentración de mercurio en vertederos se estima en 1 ppm, y proviene principalmente de fluorescentes, baterías, pilas, termómetros, etc. El principal problema es que en las condiciones de los vertederos se forma fácilmente metil mercurio, una sustancia muy contaminante.

En cuanto a los compuestos volátiles, los principales COV's emitidos se muestran en la Tabla 8.32.

Tabla 8.32. Concentración de COV's emitidos por vertederos. (Fuente: Themelis, N.J.).

COV	Concentración (ppbv)
Acetona	6.838
Benceno	2.057
Clorobenceno	82
Cloroformo	245
1,1-dicloroetano	2.801
Diclorometano	25.694
Cloruro de dietileno	2.835
Etilbenceno	7.334
Metil etil cetona	3.092
1,1,1-tricloroetano	615
Tricloroetileno	2.079
Tolueno	34.907
Tetracloroetileno	5.244
Cloruro de vinilo	3.508
Estireno	1.517
Acetato de vinilo	5.663
Xileno	2.651

7.1.1. Recuperación de energía en vertederos de RSU

El biogás se genera en procesos de fermentación anaeróbia desarrollados en el interior del vertedero, mediante los cuales, una flora bacteriana degrada la materia orgánica existente en los residuos. Al ser un proceso biológico, los parámetros que influyen sobre el mismo son diversos y destacan principalmente:

- Composición del residuo vertido: porcentaje de materia orgánica biodegradable, humedad, tanto del residuo como posteriormente del lecho del vertedero, presencia de nutrientes o inhibidores.
- Sistema de gestión del vertido de residuos: grado de compactación del vertedero, mezcla de distintos residuos, recirculación de lixiviados, sellado del vertedero y su recubrimiento diario, etc.
- Edad del vertido.
- Condiciones climatológicas de la zona, principalmente nivel de lluvias y variaciones de temperatura.

El resultado final aproximado implica que un metro cúbico de biogás se genera a partir de 5-10 kg de residuos con un 50% de materia orgánica, resultando una mezcla de gases compuesta por un 45-60% de metano, 40-60% de dióxido de carbono, 2-5% de nitrógeno, 1% de oxígeno, pequeñas cantidades de amoníaco, monóxido de carbono, hidrógeno, etc., y cantidades traza de otros constituyentes como mercaptanos, compuestos organosulfurados, etc.

De todo el gas generado, aproximadamente, entre un 50 y un 80% estará disponible para su recolección y, de este, un 60% durante los 10 primeros años, un 35% en los siguientes 10 años y, el resto en un plazo posterior de 20 a 30 años.

Cuando los caudales extraídos son suficientes, es posible el aprovechamiento energético del mismo. Las técnicas empleadas en la desgasificación y posterior aprovechamiento energético suelen consistir en la exportación (a la red pública) de energía eléctrica.

En consecuencia, la aplicación práctica de la desgasificación de un vertedero comienza por la instalación de un sistema de desgasificación, el cual se compone por tres elementos principales:

1. Sistema de captación de gases.
2. Conducción y control.
3. Transporte.

La captación de gases se realiza mediante una red de pozos verticales, o zanjas horizontales, según la profundidad del vaso de vertido, distribuidos regularmente por toda la superficie del vertedero, en los que se introducen tuberías ranuradas (normalmente de polietileno) en un 20-30% de su longitud con el objetivo de que penetre el gas y, correctamente sellados en su superficie para evitar entradas de oxígeno al caudal de gas ni salidas de este a la atmósfera.

La conducción y control de los gases hasta los colectores principales consiste simplemente en tender tuberías de polietileno desde la cabeza de los pozos. Estas tuberías quedan enterradas bajo varias capas de áridos aunque para una gestión óptima del campo de gas, conviene que se encuentren en la superficie del vertedero, de esta manera, cualquier trabajo de mantenimiento sobre la misma sea sencillo; extracción de condensados, conservación de pendientes en los tendidos, etc.

Existen básicamente dos métodos de control de biogás en el mercado: automático o manual. El primero consiste en dotar al sistema de analizadores de metano, oxígeno, caudalímetros y tomas de presión que, de forma automática, envían los datos a un autómata central que reacciona regulando de una forma u otra las válvulas instaladas. El sistema manual se basa en la instalación en cada pozo de válvulas de regulación y puntos de toma de muestra manuales, de tal modo que un operario, una o dos veces por semana comprueba el estado de todos los pozos y, en consecuencia, regula las válvulas. El segundo sistema resulta más adecuado para el correcto seguimiento del campo de gas debido a que las variaciones de caudal y presión en los pozos se producen de forma lenta y progresiva y casi nunca repentina, siendo así fácilmente detectables en un seguimiento continuo, por lo que no es preciso instalar un sistema automático que destaca por su alto coste de montaje y mantenimiento.

Por último, el transporte de gases hasta la estación de aspiración se realiza mediante colectores de mayor diámetro a los que se conectan los ramales de conducción. Uno de los factores más importantes a tener en cuenta para el correcto funcionamiento de estas líneas es la posibilidad de eliminación de los condensados que se forman en el interior de las tuberías por el cambio térmico, de 35 a 50 ℃, entre el interior del vertedero y la gran saturación en vapor de agua del gas. En casos de tendidos sin la suficiente pendiente, pueden formarse tapones que anulan o reducen la efectividad de la red de captación.

El aprovechamiento energético del biogás viene determinado por su poder calorífico. El metano tiene un PCI de 8.900 kcal/Nm^3, pero teniendo en cuenta al resto de componentes del biogás, resulta finalmente un PCI de aproximadamente 4.200 kcal/Nm^3. Los equipos más modernos queman eficazmente el gas con una proporción muy baja de aire, reduciendo las emisiones de gases contaminantes. Una ratio habitual de producción es obtener un kilovatio hora a partir de aproximadamente 0,6 m^3 de biogás.

Desde el punto de vista de impacto, probablemente el más importante es el lixiviado. De ello se habla extensamente en el Capítulo 11 de esta obra. A diferencia del biogás que, como se ha visto puede ser valorizado, el lixiviado, en el mejor de los casos, una vez tratado se devuelve al cauce público.

7.2. PLANTAS DE COMPOSTAJE

El compostaje es el proceso mediante el cual la fracción orgánica contenida en los residuos sólidos se descompone produciendo un abono apto para el suelo vegetal. Las materias primas no provienen únicamente de los RSU, sino que su origen puede ser diverso: residuos de poda, estiércol, fangos de EDAR, paja, etc. El proceso consiste en la oxidación de la materia orgánica en presencia de microorganismos, obteniendo CO_2 y H_2O, además de energía calórica y compost. En la Figura 8.46 se muestra el proceso básico de compostaje.

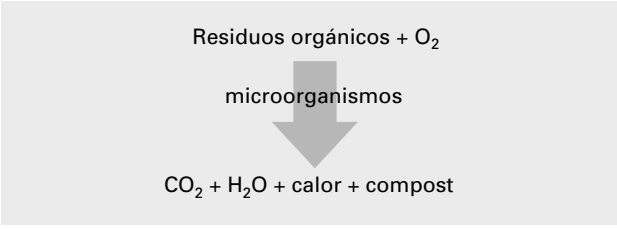


Figura 8.46. Proceso básico de obtención de compost.

Es muy importante tener en cuenta el mercado potencial y no acumular el producto si no encuentra salida comercial. La acumulación acaba provocando problemas, en especial de olores. Igualmente se debe garantizar la calidad del compost para evitar la contaminación del suelo y de las aguas superficiales y subterráneas. El principal problema es que las materias primas pueden contener sustancias tóxicas, compuestos orgánicos y metales como: Cd, Cr, Hg, Ni, Pb, Co, Mn, etc., que pueden llegar a los seres humanos a través de la cadena alimentaria.

La buena calidad del compost es una condición indispensable para que pueda ser comercializado y empleado posteriormente. Para ello debe conocerse el origen de las materias primas, el contenido y calidad de la materia orgánica y el contenido de elementos fertilizantes. En la Tabla 8.33 se muestra el criterio de calidad del compost. Si el porcentaje de nutrientes es muy bajo, el compost es un mal fertilizador. En cambio, si el contenido es muy elevado puede causar episodios de eutrofización en aguas.

Tabla 8.33. Criterio de calidad del compost. (Fuente: Röben, E.).

Parámetro	Mínimo	Máximo
Contenido en agua (%)	35	50
Contenido en proteínas (%)	30	35
Contenido en celulosa (%)	3	5
Densidad (kg/m3)	550	850
pH	7,0	8,3
N (mg/l)	100	400
P_2O_5 (mg/l)	500	2.000
K_2O (mg/l)	1.000	5.000
MgO (mg/l)	150	500

También es muy importante conocer la concentración de sustancias potencialmente tóxicas, lo que puede impedir su utilización. En ocasiones falta una sistemática que indique al usuario su aplicación y *modus operandi*, ya que el compost obtenido depende de la materia prima de partida. En la Tabla 8.34 se muestran las características de las materias primas habitualmente empleadas para la elaboración de compost.

Es muy importante controlar la relación entre la concentración de carbono y nitrógeno (relación C/N), ya que los microorganismos necesitan un aporte de nutrientes para desarrollar su actividad metabólica y fisiológica. Si la relación C/N es muy elevada, la actividad biológica disminuye, mientras que si es muy baja, se desprenden malos olores a consecuencia de la formación de compuestos amoniacales.

Durante la fase de implantación de la planta de compostaje los principales impactos son: ocupación de terreno, ruido, transporte de material, generación de polvo y partículas sólidas, e impacto visual. La superficie de terreno ocupada depende de la capacidad de tratamiento de la planta.

Tabla 8.34. Características de las materias primas empleadas para la obtención de compost. (Fuente: Röben, E.).

Tipo de residuos	Materia org. (%)	Relación C/N	N (mg/kg)	P_2O_5 (mg/kg)	K_2O (mg/kg)	CaO (mg/kg)	MgO (mg/kg)	Aptitud
Domiciliarios	20-80	12-20	0,6-2,2	0,3-1,5	0,4-1,4	0,5-4,8	0,5-2,1	mala
Poda	15-75	20-60	0,3-2,0	0,1-2,3	0,4-3,4	0,4-12	0,2-1,5	buena
Papel y madera	75	170-800	0,2-1,5	0,2-0,6	0,02-0,1	0,5-1,5	0,1-0,4	buena
Estiércol de vaca	20,3	20	0,6	0,4	0,7	0,6	0,2	mala
Estiércol de cerdo	25,4	25	0,7	0,3	0,8	0,2	0,2	mala
Estiércol de pollo	10-15	-	9,8	8,3	4,8	17,3	1,7	mala
Paja	-	100	0,4	2,3	2,1	0,4	0,2	buena

Por otra parte, la etapa de operación y mantenimiento origina malos olores (por ello es preceptivo instalar estas plantas en locales cerrados, aspirar y tratar el aire interior), lixiviados con elevado contenido en metales pesados, residuos sólidos provenientes de los rechazos y emisiones gaseosas (COV's, bifenilos policlorados, PAH's ~~hid~~rocarburos aromáticos policíclicos~~, a~~minas aromáticas, clorofenoles, etc.). Para prevenir la generación de lixiviados se requiere controlar adecuadamente la humedad del producto, teniendo en cuenta que cada residuo necesita una humedad determinada. En los Capítulos 2, 3 y 4 de esta obra se habla extensamente de ello.

7.3. ESTACIONES DEPURADORAS DE AGUAS RESIDUALES

Las EDAR's son instalaciones que separan la fracción sólida y, según qué tipo, la materia disuelta, del agua. ~~É~~sta es vertida y la contaminación se transfiere a un residuo pastoso denominado fango. Los decantadores generan un fango primario con una cantidad de materia seca del 2-4%, la estación de fangos lo concentra hasta un 25% de material seco. Semejante humedad no es admitida por los vertederos para depositar los fangos. Así que debe usarse otro tipo de deshidratación, hasta lograr un 35%, o bien recurrir al secado térmico.

En cualquier caso las cantidades de fango son muy elevadas y la cifra irá en aumento a medida que se vayan depurando las aguas residuales.

Aquellos fangos que no tengan contaminación por metales pesados ni por compuestos químicos tóxicos, pueden destinarse a compostaje o aplicarse al suelo, si éste lo admite. Cuando existe cierto grado de contaminación las vías de valorización se reducen a la ceramización, la vitrificación o a la valorización energética.

El desarrollo industrial a nivel mundial, y el incremento del consumo de la población ha conducido a un considerable aumento en la generación de aguas residuales. Las EDAR's son instalaciones que tra-

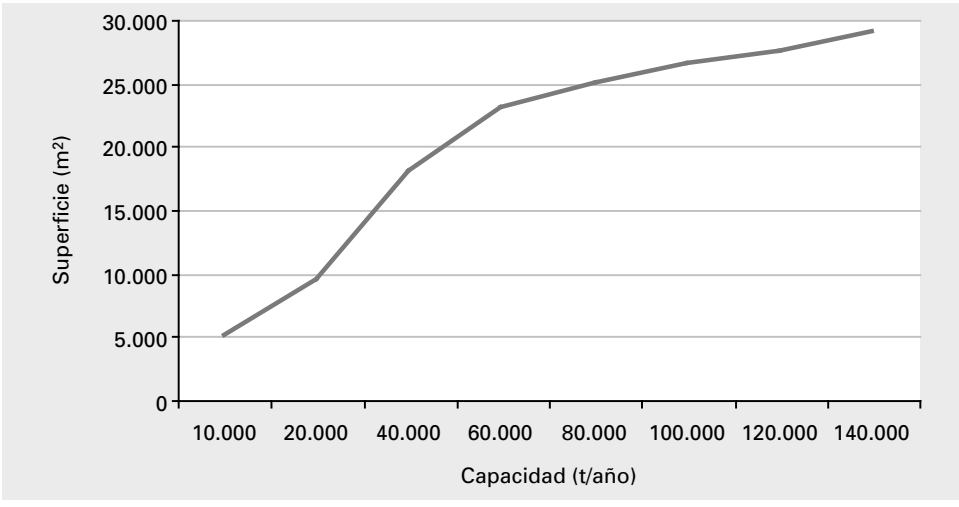


Figura 8.47. Variación de la superficie ocupada por una planta de compostaje (en m^2) en función de la capacidad de tratamiento (t/año). (Fuente: Funiber).

tan las aguas residuales urbanas e industriales mediante una serie de procesos físicos, químicos y/o biológicos (aerobios o anaerobios), devolviéndolas la calidad necesaria para que puedan ser vertidas de nuevo a los cauces naturales. Su objetivo es retirar las sustancias contaminantes presentes en el agua (materia orgánica, sustancias amoniacales, fósforo, etc.), y transferir los contaminantes a los fangos estables que posteriormente pueden tratarse de forma adecuada. Una instalación de este tipo, que evita los graves problemas que causan las aguas residuales sobre las aguas continentales, implica también un impacto medioambiental sobre el entorno: consumo de energía, utilización de productos químicos para la estabilización de las aguas, emisiones gaseosas, generación de fangos, etc. Además, los fangos tendrán un impacto en función de cuál sea su destino: vertido en depósitos controlados o combustión en plantas de incineración o gasificación.

En una estación depuradora se diferencian los impactos ocurridos durante la fase de construcción de la planta, los que tienen lugar a lo largo de la etapa de operación y los ocurridos al verter las aguas a los cauces. Entre los impactos generados en la fase de construcción de la instalación se distingue el ruido y las vibraciones procedentes de la propia obra y de la circulación de camiones y maquinaria pesada, la emisión de polvo y partículas sólidas en suspensión a causa de la extracción y transporte de materiales, la generación de residuos sólidos y de los residuos de construcción habituales, el impacto visual causado por la alteración del paisaje, y la contaminación de aguas superficiales y subterráneas a consecuencia de vertidos y fugas accidentales.

Por otra parte, entre los impactos producidos durante la etapa de explotación de la planta depuradora destacan el ruido generado por los equipos, los malos olores a consecuencia de las sustancias volátiles evaporadas durante el proceso, la contaminación de aguas y la contaminación atmosférica causada por emisiones gaseosas, la aparición de insectos y otros animales, el impacto visual, y la modificación de los hábitos de la fauna presente en las zonas próximas a la EDAR.

Por lo que se refiere al propio vertido del agua una vez que ha sido sometida al proceso de depuración se detectan los siguientes impactos: estratificación de la masa de agua a consecuencia de las diferentes densidades entre el vertido y el agua del cauce receptor, deterioro de la calidad del agua debido a la presencia de contaminantes en el vertido (oxígeno disuelto, sustancias amoniacales, nutrientes, materia orgánica, coliformes fecales, metales pesados, sólidos en suspensión, etc.), y posibles episodios de eutrofización a causa del incremento de nutrientes en las aguas receptoras. Además, las partículas no disueltas del agua residual pueden ocasionar deposiciones de fango. La materia orgánica contenida en las aguas de vertido se puede descomponer, aumentando el consumo del oxígeno presente en el agua. Hay veces en que la capacidad de autodepuración de las aguas naturales es insuficiente, y un vertido de aguas residuales depuradas incorrectamente puede afectar gravemente a la calidad del cauce. Si en el agua no existe oxígeno suficiente para oxidar la materia orgánica arrastrada por el vertido, la biodegradación tiene lugar en condiciones anaeróbicas, con la consiguiente formación de H_2S y sulfuros. Naturalmente, a todo ello hay que añadir la muerte de la flora y fauna presente en el río.

Para evitar en gran medida los impactos asociados a las plantas depuradoras es necesario establecer la cantidad y calidad de las aguas residuales que deben tratarse en la instalación, teniendo en cuenta las oscilaciones habituales de caudal y la tasa anual de precipitación. Es conveniente adaptar la capacidad de tratamiento de las aguas residuales al cauce receptor, teniendo en cuenta las posibilidades de reutilización, en base a la instalación de un tratamiento terciario, como agua de riego en plantaciones agrícolas próximas.

7.3.1. Reutilización de aguas residuales

Los dos «residuos» secundarios de una EDAR, ya sea de aguas urbanas o industriales, son los fangos (a los que se destina el Capítulo 12 de esta obra) y la propia agua depurada. Sin embargo, según se trate de aguas urbanas o industriales la problemática de valorización es bien diferente.

Aguas residuales urbanas. Muchas depuradoras urbanas, en especial en Cataluña, disponen de una depuración terciaria, lo que asegura la reutilización del agua para un sinfín de usos, excepto para agua de boca. Hasta la fecha ha existido un vacío de cobertura jurídica, que se espera que se subsane con la reforma de la Ley de Aguas que se debe aprobar en 2007 (El proyecto de Ley de Aguas va sustituir las escasas referencias a la reutilización de aguas residuales que había en la norma en uso desde 1986). Ello permitiría aprovechar 1.500 hectómetros cúbicos al año de aguas residuales.

En 2005, el consumo de agua en España fue de 3.277 Hm^3 que se distribuyeron de la siguiente forma:

- Agricultura: 2.382 Hm^3, el 72,4%. (Es interesante consultar el Plan Nacional de Regadíos, elaborado por el Ministerio de Agricultura de España en 2006).
- Industria: 488 Hm^3, el 14,8%.
- Abastecimiento doméstico: 414 Hm^3, el 12,6%. Cifra que equivale, aproximadamente, a 114 l/persona y día.
- Ganadería: 7 Hm^3, el 0,2%.

La posibilidad de emplear 1.500 Hm^3 supondría un ahorro del 45%, lo que en un país amenazado por la sequía como España es importantísimo. Como es lógico, el tratamiento terciario tiene un coste que a juzgar por los precios que pagan los ciudadanos de nuestro entorno debería ser perfectamente asequible. Los españoles pagan una de las tarifas de agua mas bajas de la UE, 1,28 €/m^3 de promedio, cuando en Francia oscila de 3 a 5 y en Dinamarca de 6 a 8. Es decir, existe un margen amplio. En el caso de la agricultura, el principal consumidor, paradójicamente cuenta con la tarifa mas baja 0,35 €/m^3. En la provincia de Barcelona existen campos de cultivo regados con aguas residuales procedentes de un terciario que proporciona una calidad muy superior a la del freático. En resumen, el problema es más económico y legal que técnico.

Aguas residuales industriales. En este caso la problemática es completamente diferente. Cada industria produce una tipología de agua residual especial y diferenciada. En principio, de cara al aprovechamiento lo más aconsejable es la reutilización interna.

Como experiencia industrial vale la pena citar las conclusiones de reutilización de aguas industriales que se ha llevado a cabo, a escala piloto (en plantas de demostración del orden de 1 m^3/h) todas ellas exitosas, en campos tan dispares como:

- Aguas industriales de la industria textil.
- Aguas industriales de la industria química.
- Aguas industriales de la industria papelera.

Los ensayos y estudios se han podido realizar gracias al convenio de colaboración firmado en abril de 2005 entre la Agencia Catalana del Agua (Departamento de Medio Ambiente del Gobierno Catalán) y el Consejo de Cámaras de Comercio de Cataluña, que ha sido la entidad que ha desarrollado los trabajos.

Otra posibilidad estriba en la utilización en cadena del agua reutilizada, por ejemplo: el agua saliente del terciario (planta de demostración integrada por una ultrafiltración y una ósmosis inversa) de la depuradora de una industria textil se ha usado con éxito en otra industria textil y a la salida a una torre de enfriamiento.

La reutilización en torres de enfriamiento es una de las aplicaciones más relevantes y que se debería potenciar. Se calcula que la industria química catalana, muy importante, gasta el 50% del agua en circuitos de refrigeración. Otra aplicación, también digna de citar en algunos sectores, es el uso del agua en circuito cerrado, como la industria cerámica.

7.4. PLANTAS DE TRATAMIENTO DE PURINES

Las granjas ganaderas han proliferado en los últimos años, lo que implica la aparición de diversos problemas medioambientales. La elevada producción de purines, el residuo generado en mayor cantidad por la industria ganadera, se ha convertido en un problema capaz de contaminar suelos, aguas superficiales y acuíferos, además de afectar a otras actividades económicas. Las consecuencias directas de la gestión incorrecta de purines son la pérdida de fertilidad de los terrenos, la contaminación de aguas y la emisión de olores, que afectan negativamente a la agricultura y a la calidad de vida de las poblaciones próximas.

La composición del purín depende de diversos factores: edad y tipo de animal, alimentación, época del año, etc. En la Tabla 8.35 se muestran los parámetros químicos y físicos que caracterizan a los purines.

Como se observa en la Tabla 8.35 el elevado contenido en sustancias tóxicas hace que el vertido incontrolado de purines cause la contaminación de suelos, y aguas superficiales y subterráneas. Las consecuencias sobre el suelo se traducen en una disminución de la fertilidad y el aumento de salinidad. Los efectos sobre el medio hídrico son:

- Desaparición de especies.
- Descomposición anaerobia de la materia orgánica, con la consiguiente generación de compuestos de azufre.
- Acumulación de metales pesados.
- Eutrofización.
- Aumento de la turbidez.
- Sedimentación de fangos.

Tabla 8.35. Parámetros químicos y físicos de los purines. (Fuente: Funiber).

Parámetro	Valor típico
Materia seca	87,5 kg/m^3
Materia orgánica	40-70% (materia seca)
N total	5,9 kg/m^3
N orgánico	2,5 kg/m^3
N amoniacal	3,4 kg/m^3
P_2O_5	5,3 kg/m^3
K_2O	3,6 kg/m^3
Cu	200-750 mg/kg (materia seca)
Zn	200-600 mg/kg (materia seca)
Fe	1.000-1.500 mg/kg (materia seca)
Mn	300-700 mg/kg (materia seca)
Ni	6 mg/kg (materia seca)
Mo	4 mg/kg (materia seca)
B	20-140 mg/kg (materia seca)
pH	7,2-8
Conductividad	42 dS/m
DQO	25.000 ppm
DBO_5	20.000-30.000 ppm

Aprovechando que los purines contienen un elevado porcentaje de agua (superior al 85%), un método adecuado para su gestión consiste en la evaporación del agua y la producción de abono orgánico. Para llevar a cabo la deshidratación de purines se pueden construir plantas de cogeneración de hasta 10 MW. En estas plantas se utiliza gas natural como combustible, y se aprovecha la energía de la combustión para producir electricidad y secar los purines. Otra opción es la digestión anaerobia de purines, capaz de producir metano (por cada tonelada de purín se generan entre 25 y 30 m^3 de CH_4), y que a diferencia de la cogeneración no consume energía, sino que la produce para poder ser empleada en la propia instalación. El purín desgasificado y estabilizado puede ser utilizado posteriormente como fertilizante. Para llevar a cabo estas opciones hay que partir de unos purines con un mínimo de agua y, a poder ser, emplear la co-digestión.

Entre los impactos asociados a la deshidratación de purines mediante cogeneración destaca la aparición de olores, ya que al calentar los purines se evapora el agua, lo que ayuda a dispersar los malos olores. Otro de los efectos negativos es la generación de emisiones atmosféricas contaminantes a causa de la combustión del gas natural. Además, la planta de cogeneración requiere una red de distribución de gas natural cuya construcción genera diversos impactos ambientales: impacto visual, emisiones de polvo a la atmósfera a causa de la adecuación de los terrenos, ruido, alteración del paisaje, etc. Otro de los problemas es el elevado consumo de energía, ya que el objetivo de las plantas de cogeneración no siempre es deshidratar los purines sino generar electricidad y venderla, y la producción de energía eléctrica aumenta a medida que se consume más gas natural, lo que implica un incremento de la contaminación y, en definitiva, de los impactos ambientales asociados a la combustión de combustibles fósiles. Otro aspecto negativo es que a pesar de que los purines contienen energía en forma de metano, no se aprovecha con la cogeneración, pues la electricidad que se obtiene proviene de la combustión del gas natural.

Uno de los aspectos de impacto ambiental y sanitario más importante a las plantas que evaporan el agua de los purines es que, precisamente, no llegan a evaporar el cien por cien y una parte del agua se emite en forma de microgotas líquidas lo que permite la supervivencia de microorganismos que pueden ser transferidos a gran distancia del punto de emisión.

7.5. PLANTAS INCINERADORAS DE RSU

Las incineradoras son instalaciones donde se oxida a alta temperatura la fracción combustible de los residuos sólidos urbanos y generan dos tipos de residuos: las escorias y las cenizas volantes. En principio, si la planta dispone de las adecuadas medidas correctoras los gases se emiten limpios a la atmósfera y no hay aguas residuales.

A grandes cifras el 22-25% del RSU que entra en la planta son materiales inertes desde el punto de vista energético que son evacuados por la parte inferior de la parrilla del horno en forma de escorias. Estas escorias contienen los inertes de RSU, como el vidrio, metales, etc., pero también contienen cierta cantidad de material orgánica y metales pesados. No obstante tienen un alto potencial de reciclabilidad.

Otro 2-3% corresponde a las cenizas volantes que procede del material particulado arrastrado por los gases y retenido en el electrofiltro o filtro de mangas

y demás sistemas de limpieza de los gases. También contienen productos de condensación de sales solubles y, sobre todo, gran cantidad de metales pesados. Su reciclado es mucho más complicado y se ha ido exponiendo en capítulos anteriores y, en particular, en el 11.

7.5.1. Empleo de escoria de incineración de RSU como árido

La escoria procedente de la incineración de RSU constituye entre el 21 y el 25% en peso de la cantidad total de RSU que entra en la incineradora. Es evidente que la reducción de peso es muy importante, sin embargo un porcentaje residual tan elevado induce a buscar vías de valorización.

La primera condición para la reutilización de las escorias de incineración como agregado es que no contenga elementos férreos de gran tamaño. Estos son fáciles de extraer con electroimanes. Otra condición es la ausencia, o el contenido mínimo de materia orgánica, ya que ello puede dar lugar a inestabilidad mecánica. Los sistemas de combustión actuales, con parrillas, de muchas incineradoras, conduce a que muchas escorias contengan cantidades variables de materia orgánica.

El paso siguiente para la valorización es la trituración hasta conseguir tres tamaños de grano. El objetivo es lograr que este agregado pueda constituir el 70% del total de áridos del hormigón. Debe evitarse el polvo ya que, al margen de no ser útil como agregado, contiene una mayor cantidad de metales pesados. La Tabla 8.36 reproduce la composición de una escoria de incineración estándar.

Los primeros ensayos para este cometido han sido alentadores y la aplicación más extendida ha sido la del uso de la escoria como material a granel para rellenos y explanadas.

Tabla 8.36. Caracterización de una escoria de incineración de RSU. Según granulometría

Fracción	5,5-8 mm	8-11,5 mm	11,5-16 mm
Escoria magnética			
Escoria no magnética	45,0	55,6	50,6
Vidrio	44,9	40,0	45,9
Materiales cerámicos	1,3	2,4	3,4
Piedras	8,7	2,0	10,1
Papel	0,1	—	—

El problema más importante que surge en el uso de estas escorias es el lixiviado. Cuando se emplea para subbase de carretera los lixiviados contienen, por orden de importancia: sulfatos, cloruros, Zn, Al, Ni, Cu, Pb, Cr y Cd.

Debido a la gran cantidad de tipos de escoria que existen y a su diferente naturaleza fisicoquímica, la Agencia Central de Medio Ambiente sueca ha elaborado un protocolo de aplicación que, en grandes líneas, puede sintetizarse en:

- Cribado inicial para separar todos los materiales magnéticos.
- No usar tamaños de grano superiores a 50 mm.
- No emplear más del 10% de partículas de tamaño inferior a 0,06 mm.
- Poseer una pérdida por calcinación inferior al 4%.
- El material debe estar almacenado un mínimo de tres meses.
- No usar aquellas escorias cuyos ensayos de laboratorio denoten una lixiviación de metales que pueden reproducirse en el proyecto definitivo.

A partir de estas normas generales las aplicaciones más comunes se deberían circunscribir a:

- Usar escorias para subbases, o rellenos en general cuyo espesor no exceda de 3 m.
- La escoria debe colocarse por encima del nivel del agua y por debajo del pavimento.
- Emplearla para rellenar, preferentemente, los cimientos de las edificaciones livianas.
- Usarla para la fabricación de subbases de carreteras con tráfico ligero.

En donde sea posible se recomienda la estabilización de las escorias a base de cemento o cenizas volantes de centrales térmicas.

7.5.2. Tratamiento de cenizas volantes de incineradoras de RSU

Una incineradora convencional en una zona que exista una cierta recogida selectiva genera, por término medio, un 22% de residuos sólidos respecto a la masa entrante. De esta cifra un 20% corresponden a las escorias y el 2% restante a las cenizas volantes de la incineración de RSU. Estas últimas suelen ser más conflictivas debido, sobre todo, a la gran presencia de metales pesados y sales solubles.

Los sistemas de tratamiento más utilizados son:

- Separación.
- Estabilización/solidificación.
- Tratamiento térmico (vitrificación).

La estabilización, sin solidificación, consiste en añadir fosfatos solubles que forman minerales fosfatados insolubles. Uno de los factores negativos que más preocupan de la deposición de las cenizas volantes en vertederos controlados es la lixiviación a largo plazo, es por ello que constantemente se están ensayando nuevos sistemas de tratamiento y, que duda cabe de que, aquellos procedimientos que resulten absolutamente seguros a los tests de lixiviación, también servirán para reciclar las cenizas en forma de materiales de construcción.

Dicha estabilización consiste en mezclar la ceniza con agua para disolver los metales solubles y se mezclan los fosfatos con una proporción de 1 a 8% de H_3PO_4, dependiendo de la naturaleza de las cenizas. Los fosfatos y los carbonatos precipitan. Así se reduce, casi por debajo los índices de detección, los niveles de Pb y Cd. La Tabla 8.37 siguiente resume los valores de estos metales, en mg/l, en los lixiviados de las cenizas de diversas plantas americana.

Es obvio que, a la vista de resultados actuales, tan sólo la vitrificación se revela como una tecnología apta para el reciclaje de las cenizas de incineradoras.

Tabla 8.37. Lixiviados de las cenizas volantes

	Límite admitido	Sin tratar	Tratada
Plomo	5,0	2,3	< 0,5
Cadmio	1,0	1,3	0,078

8. La industria química

En el año 2004 la economía internacional inició una sólida recuperación que en el caso del sector químico estuvo liderada por Estados Unidos y el sudeste asiático; fue mucho menos intensa en Europa, fundamentalmente debido a una menor dinamización del consumo. El volumen de negocio mundial de la industria química alcanzó los 1,77 billones de euros.

Considerando las cifras del año 2004, la Europa de los 25 aglutina la tercera parte de la producción química mundial. Asia se sitúa actualmente como la segunda zona productora, especialmente impulsada por el crecimiento de China y los países del sudeste asiático; EE UU representa la cuarta parte de la producción química mundial, siendo así que la producción conjunta de estas tres zonas representa el 84% del total.

El volumen de negocio de la industria química europea (UE-25), ascendió a 578.000 millones de euros en 2004. Los 10 países de la ampliación generan casi 27.000 millones de Euros, los que supone menos del 5% del total de la UE. Alemania, tercer productor mundial, es el país que acumula mayor facturación en la Unión Europea, generando la cuarta parte de la producción química comunitaria. Francia se mantiene como segundo productor, seguida de Italia y el Reino Unido. España encabeza un grupo de países que suponen el 7% de la producción, y en el que destaca la presencia de Irlanda, país que en los últimos años ha absorbido gran parte de las inversiones químicas internacionales y que ha duplicado su producción en apenas cinco años.

En España, la industria química, con un volumen de ventas en 2004 de 41.623 millones de euros, representaba, en ese año, el 10% del total de la cifra de negocios del conjunto de la industria española, que superaba los 423.000 millones. Así, el sector químico se constituía en el cuarto sector industrial tras los sectores de alimentación, bebidas y tabaco (20% del total), material de transporte (15%) y metalurgia y productos metálicos (14%).

La industria química española se encuentra ubicada principalmente en Cataluña, comunidad donde se genera casi la mitad de la producción (47,1% en el año 2004). Junto a Madrid, Valencia y Andalucía, las cuatro comunidades agrupan más del 75% del total de la producción química española.

El excelente comportamiento de la industria química española en los últimos 25 años, etapa en la que ha registrado un crecimiento medio anual del 4%, ha generado también una evolución hacia las producciones de mayor valor añadido.

El sector químico es fundamental en una sociedad desarrollada puesto que abarca desde la industria petroquímica (combustibles) a los plásticos pasando

por los detergentes, los medicamentos, los fertilizantes, etc. Por desgracia la prosperidad de esta industria lleva pareja la generación de una importante cantidad de residuos. Según la memoria de la Agencia de Residuos del gobierno catalán, en el año 1997, el sector ligado directa o indirectamente a la industria química generó cerca del 16% del total de los residuos industriales de Cataluña (Tabla 8.38).

Tabla 8.38. Generación de residuos en la industria química catalana

Actividad industrial	Empresas	Ton/Año
Refinerías de petróleo	3	12.095
Petroquímica-química orgánica	36	128.064
Química inorgánica de base	29	63.769
Fabricación materias primas plásticas	49	87.861
Fabricación de fertilizantes	21	1.405
Fabricación de fitosanitarios	10	1.279
Química fina	45	120.126
Otros productos farmacéuticos	142	21.055
Otros productos químicos	652	143.577
Transformación plástico y caucho	1.066	69.778
TOTAL	2.053	649.009

De la tabla vale la pena hacer unas observaciones. Si bien la media estadística arroja una generación de 316 t/año empresa, la realidad es muy diferente. No son comparables las 65 t/año que producen las industrias de transformación de plásticos y caucho con las 4.031 t/año de las petroquímicas o las 129 t/año de las que producen productos fitosanitarios. La mayor parte de estos residuos son tóxicos y peligrosos.

Otros aspectos a tener en cuenta es la naturaleza de los propios residuos. Como resultado de reacciones químicas son residuos complejos y difíciles de reutilización. A ello hay que añadir factores de riesgo como la inflamabilidad, la explosividad o la alta toxicidad.

De acuerdo con los datos de emisiones de industrias químicas de los Estados Unidos para el año 2003, la mayor parte de las emisiones producidas van a parar al subsuelo (44,0%) y a la atmósfera (33,5%). Las emisiones al subsuelo se originan a partir de las inyecciones efectuadas en pozos con el fin de confinar los fluidos residuales en zonas profundas por debajo de los acuíferos. Las emisiones a lagos o corrientes superficiales alcanza al 11,5% del total.

8.1. LA INDUSTRIA PETROQUÍMICA

Del petróleo se obtienen determinados compuestos que son la base de diversas cadenas productivas que acaban en una amplia gama de productos denominados petroquímicos, que después se utilizan en las industrias de fertilizantes, plásticos, alimenticia, farmacéutica, química y textil, entre otras.

La utilización del petróleo y el gas natural como fuentes de productos petroquímicos ha sido posible gracias al desarrollo de técnicas de transformación de su estructura molecular. El crecimiento de la demanda de los productos petroquímicos se ha debido al desplazamiento de las materias primas tradicionales por las nuevas materias sintéticas:

- *Industria textil:* fibras sintéticas que suplen a la lana y el algodón.
- *Industria del caucho:* nuevos productos con iguales propiedades y a veces superiores a las del caucho natural.
- *Industria de envases y embalajes:* el polietileno como alternativa al vidrio y al celofán, plásticos para la construcción, por su gran resistencia a la corrosión y a las inclemencias del tiempo, por su ligereza y flexibilidad.

Las etapas del desarrollo petroquímico son:

1. Fabricación de materias de base o productos de primera generación. Partiendo del petróleo y del gas natural de los que se obtienen diversos productos básicos pilares de la petroquímica. Los dos grupos más importantes son las olefinas y los aromáticos.
2. Introducción de átomos de ciertos componentes (oxígeno, nitrógeno y azufre) en los productos básicos, para obtener productos de segunda generación (productos intermedios).
3. Elaboración de productos de consumo, conjugando los productos básicos e intermedios. Su diversidad es asombrosa y alcanza una casi infinita variedad de productos habituales de consumo (fibras, cauchos, plásticos, detergentes, pinturas, barnices, abonos, anticongelantes, perfumes, explosivos, aislantes, alimentos, etc.).

Las principales materias de base o cadenas petroquímicas son las del gas natural, las olefinas ligeras (etileno, propileno y butenos) y la de los aromáticos.

Para obtener estas materias la industria petroquímica utiliza los procedimientos del «craqueo» o des-

doblamiento de moléculas pesadas en moléculas más ligeras por la acción del calor, y el «reformado» o modificación de la estructura molecular del hidrocarburo.

- Del etileno se producen un gran número de derivados, como las diferentes clases de polietileno, cloruro de vinilo, compuestos clorados, óxidos de etileno, monómeros de estireno entre otros que tienen aplicación en plásticos, recubrimientos, moldes, etc.
- Del propileno se producen compuestos como alcohol isopropílico, polipropileno y acrilonitrilo, que tienen gran aplicación en la industria de disolventes, pinturas y fibras sintéticas.
- Por deshidrogenación de butenos, o como subproducto del proceso de fabricación de etileno se obtiene el 1.3-butadieno que es una materia prima fundamental en la industria de los elastómeros, para la fabricación de neumáticos, productos sellantes, etc.

La inmensa variedad de productos terminados de la petroquímica puede clasificarse en cinco grupos:

- Los plásticos.
- Las fibras sintéticas.
- Los cauchos sintéticos o elastómeros.
- Los detergentes.
- Los abonos nitrogenados.

Plásticos: El nombre común de plásticos se debe a la propiedad que tienen de ser deformables por plasticidad (frente a la elasticidad), bajo la influencia del calor, la presión o de ambos a la vez. Desde el punto de vista ambiental, el Capítulo 13 de esta obra se destina a evaluar el impacto ambiental y las posibilidades de reciclado.

Este término abarca productos que difieren entre sí por su estructura química, sus propiedades físicas, sus aplicaciones prácticas y sus procesos de fabricación.

Hay tres grandes familias de plásticos: los termoplásticos, los termoendurecibles y los poliuretanos.

La producción española de primeras materias plásticas en el año 2003, presentó un crecimiento respecto al año 2002 del 3,1%, hasta alcanzar a 3.715.104 toneladas. El consumo medio de primeras materias plásticas en España por habitante se ha situado en los 97,1 kg.

Fibras sintéticas: Las fibras sintéticas se obtienen por hilado de sustancias fundidas. La primera que se comercializó fue el nylon, en 1938. Desde entonces, el aumento de la demanda no ha dejado de crecer. Por su volumen, representan la segunda materia en importancia de la petroquímica, tras los plásticos.

Tabla 8.39. Aplicaciones de plásticos

Aplicaciones de los plásticos derivados del petróleo	
Termoplásticos (aproximadamente el 50% del consumo de plásticos del mundo)	Películas fotográficas, bolsas, papel de envasar, tuberías, canalizaciones, construcción en general, embalajes, muebles, juguetes, aislamientos, electrónica, PVCs para revestimientos, tuberías, válvulas, flores artificiales, botas, etc.
Termoendurecibles	Aislamientos eléctricos, paneles decorativos, utensilios domésticos, etc.
Poliuretanos, plásticos expandidos	Productos con apariencia de vidrio, espumas extra ligeras.

Caucho sintético y elastómeros: Es el suministrador principal de la industria del automóvil, en un elemento tan fundamental como los neumáticos. También se emplean, en algunas de sus variedades, para los calzados y para la construcción de recubrimientos de terrazas y tejados.

Detergentes: Son productos solubles en agua, cuya propiedad fundamental consiste en poder modificar la tensión superficial de los líquidos en los que se encuentra, disminuyendo o eliminando la suciedad contenida en ellos. Sus usos principales están centrados en el hogar, en forma de polvos, escamas o líquidos que sirven para lavar la ropa y la vajilla. Para suprimir sus efectos contaminantes en las aguas residuales, los detergentes se comienzan a fabricar ahora a base de productos biodegradables, que son rápidamente destruidos por los microorganismos que viven en los ríos.

Abonos: La agricultura, que hasta hace poco sólo utilizaba el estiércol natural, ha sufrido una gran revolución gracias a la química. El ácido sulfúrico, los fosfatos y la síntesis del amoniaco, han puesto en circulación una gama muy amplia de abonos químicos que mejoran el rendimiento de la agricultura. La petroquímica, mediante el suministro de hidrógeno a bajo precio para la producción de amoniaco, contribuye a promover el empleo masivo del nitrógeno asimilable en sus tres variantes: nitratos, sulfatos y urea y una infinidad de abonos complejos.

Además, la petroquímica proporciona a la agricultura productos fitosanitarios tales como herbicidas, fungicidas e insecticidas.

8.1.1. Valorización de residuos de la industria petroquímica

Desde el punto de vista medioambiental la industria petroquímica, y en particular el sector de refino del petróleo constituye un sector altamente generador de residuos. Tomando el baremo de los parámetros clásicos, estos se pueden clasificar en:

- *Emisiones atmosféricas:* las principales fuentes de emisión son los procesos de combustión y las fugas. Se producen elevadas emisiones de SO_x, partículas en suspensión, COV's y NO_x.
  El control de emisiones gaseosas se realiza durante el almacenamiento adecuado de los productos, de acuerdo con su volatilidad. En lo que respecta a las emisiones gaseosas (gases/humos) procedentes de la combustión, se llevan a cabo mediante la utilización de combustibles con bajo contenido en azufre o de aditivos para la disminución de la emisión de partículas, entre otras medidas. Asimismo, hay sistemas de medición constante de las emisiones (en forma de gases a la atmósfera) e inmisiones (la concentración de contaminantes en el aire a larga distancia del foco emisor que se deposita en los suelos), con el fin de garantizar que se cumplan las especificaciones medioambientales establecidas por las leyes.
- *Aguas residuales:* del orden de 0,4 m^3/t de crudo procesado, con altas cargas contaminantes de materia orgánica, aceites, sulfuros, amoniaco y sólidos en suspensión.
  El control de efluentes líquidos se consigue con plantas de tratamiento de aguas residuales que separan las aguas procedentes de los deslastres de los buques y las aguas de los procesos de fabricación. Mediante tratamientos fisicoquímicos y biológicos, estas aguas son depuradas para que la calidad del vertido final cumpla con las especificaciones recogidas en la legislación vigente.
- *Residuos:* se considera que el 25% de los residuos generados son tóxicos y peligrosos. Están constituidos por todo tipo de metales, compuestos inorgánicos (sulfuros y compuestos metálicos) y compuestos orgánicos. Las corrientes de mayor importancia, tanto por su cantidad como por su carga contaminante son los fangos aceitosos, los catalizadores agotados y las disoluciones de sosa agotada.
  El control de los residuos sólidos puede conseguirse mediante el tratamiento adecuado de los fangos generados en las distintas fases de los procesos y se realiza en las plantas de inertización para convertir estos residuos en materiales inocuos. Muchos de ellos son valorizables energéticamente.

Las posibilidades de valorización de las diversas corrientes se pueden sintetizar en:

- *Fangos aceitosos:* se deben recuperar los hidrocarburos (las aguas son tratadas y enviadas a la EDAR).
- *Fangos ácidos:* la valorización energética suele ser el destino más frecuente, aunque se pueden usar como cargas fundentes en la industria del acero y/o vidrio, o bien el reciclaje interno para la neutralización de flujos básicos en la propia refinería.

8.2. POSIBILIDADES DE VALORIZACIÓN DE MATERIAL FILTRANTE Y CATALIZADORES AGOTADOS

La industria química genera una gran cantidad de residuos en forma de material filtrante y catalizadores agotados. En la valorización de material filtrante: la opción más importante consiste en la regeneración de filtros, la recuperación de hidrocarburos y el envío a otra industria para su empleo como materia prima secundaria (básicamente cementeras). La Tabla 8.40 expone una síntesis de estas posibilidades.

Tabla 8.40. Posibilidades de valorización de filtros

Material filtrante	Opción de valoración
Carbón activo	Regeneración. Valorización energética.
Filtros de antracita	Reducir su uso minimizando consumo agua.
Filtros de arena	Regeneración. Reducir consumo agua. Eliminar hidrocarburos mediante lavado a contracorriente.
Filtros de arcilla	Reducir el uso de filtros. Regeneración. Eliminar hidrocarburos mediante lavado en contracorriente.
Tamices moleculares	Recuperación de subproductos. Envío a cementeras.
Cartuchos filtrantes	Regeneración. Recuperación de hidrocarburos.
Filtros de fondo de columnas de vacío	Recuperación de hidrocarburos.
Resinas de intercambio iónico	Regeneración. Envío a cementeras.

Los catalizadores se pueden clasificar en dos grupos: homogéneos y heterogéneos, según que los reactivos y el catalizador estén en la misma o en distinta fase respectivamente. Las ventajas y desventajas de ambos tipos de catalizadores se resumen como:

- Catalizador heterogéneo:
  - Fácil separación del medio reactivo.
  - Fácil regeneración.
  - Fácil reutilización.
  - Duradero.
- Catalizador homogéneo:
  - Resistente al envenenamiento.
  - Altas velocidades de reacción.
  - Elevada selectividad.
  - Sin problemas de transferencia de masa.
  - Condiciones suaves de trabajo.

La conveniencia del uso de un tipo u otro de catalizador, dependerá de la reacción química que se considere y de las mejoras que se pretendan conseguir. En general, en los procesos industriales se utilizan catalizadores heterogéneos, básicamente constituidos por metales de transición (Pd, Pt, Ni, Ti, Co, etc.) que están unidos a soportes inertes o con cierta funcionalidad ácida o básica. Como la reacción transcurre en la superficie del catalizador, la cantidad de superficie por unidad de masa (área específica) es muy importante, así como su estado químico, siendo muy susceptible al envenenamiento por adsorción de otras especies presentes en el medio reactivo.

Los catalizadores homogéneos son elementos preciados puesto que, a menudo, se obtienen incrementos notables de velocidad de reacción en condiciones suaves con la sola adición de pequeñas cantidades de material catalizador. A diferencia de la catálisis heterogénea, en la homogénea no suelen haber problemas de transferencia de masa debido a que el catalizador está homogéneamente repartido por toda la fase reactiva y presenta un mayor grado potencial de selectividad y resistencia al envenenamiento. No obstante, comparado con un catalizador heterogéneo, el homogéneo suele tener una vida media menor y es difícil de separar del medio reactivo, con lo que su recuperación y reciclaje posterior se dificulta.

En el caso de los catalizadores, uno de los problemas más importantes es la gran especialización en los metales que componen los catalizadores, circunstancia que complica la valorización.

8.2.1. Reutilización de catalizadores

Como sea que los metales empleados suelen tener un precio elevado, las posibilidades de reciclaje aumentan. En función de la composición del catalizador agotado, las posibles alternativas de valorización se indican en la Tabla 8.41.

Tabla 8.41. Reutilización de catalizadores

Catalizador agotado	Recuperación de metales	Materia prima en cementeras	Nutrientes de fósforo
Polimerización	—	—	Sí
FCC	Sí	Sí	—
Reformado catalítico	Sí	—	—
Hidrocracking	Sí	—	—
Hidrotratamiento	Sí	Sí	—
Óxido de plomo	Sí	—	—
Alúmina activada en alquilación	—	Sí	—
Alúmina activada en unidades Claus	Sí	—	—
Cloruro de cobre	Sí	—	—
Conversión en cloruros	—	Sí	—
Reformado de vapor	Sí	—	—
Unidad de desulfuración	Sí	—	—

La biocatálisis es una alternativa que se basa en el uso de enzimas como catalizadores. Los procesos biocatalíticos utilizan compuestos precursores que alimentan un biocatalizador, el cual los transforma en el compuesto deseado mediante un limitado número de etapas de funcionalización (normalmente una). Tanto la energía como el carbono necesarios para la producción del biocatalizador proceden habitualmente de fuentes de carbono fácilmente metabolizables, como azúcares, aceite de soja o metanol.

Otro aspecto diferente pero complementario es la problemática asociada a los soportes de los catalizadores. Estos suelen ser metálicos o, con mucha mayor frecuencia, cerámicos debido a sus posibilidades de aumentar la superficie específica. Tanto uno como otro son valorizables si bien por caminos diferentes. Los metálicos no presentan problema alguno, mientras que los soportes cerámicos (si no contienen gran carga del metal catalizador) se pueden enviar al horno de clínquer o, si no es factible extraer el metal, se pueden transformar en material de construcción a base de vitrificarlos.

8.3. LA INDUSTRIA QUÍMICA BÁSICA Y TRANSFORMADORA

El impacto producido por la actividad de la industria química sobre el medio ambiente dependerá, lógicamente, de las características de las emisiones de todo tipo y su efecto a corto, medio y largo plazo. De manera esquemática las posibles interacciones de la industria química con el medio ambiente se pueden sintetizar en:

- Emisiones a la atmósfera. Hay que tener en cuenta que ésta industria es una gran consumidora de energía, por lo que si a las emisiones específicas se le suman las debidas a la generación o consumo de energía se concatena el efecto contaminador. Otro aspecto a considerar es la emisión de aerosoles.
- Emisiones al medio hídrico y al suelo. Este último es muy sensible al posible derrame de líquidos peligrosos.
- Transporte y/o fugas, derrames, accidentes, etc. de materiales tóxicos.
- Riesgos asociados por la fabricación y manipulación de materiales inflamables, explosivos, etc.

Conscientes del potencial riesgo la actividad de esta industria la asociación de fabricantes de productos químicos internacionales ha elaborado un protocolo de actuaciones para prevenir los impactos de la industria. Paralelamente, la Federación Catalana de Industrias Químicas ha llegado a una serie de acuerdos con la administración ambiental autonómica tendentes a potenciar los cambios de proceso, de materias primas, reducir las emisiones, mejorar los sistemas «end of pipe» y, sobre todo, a implantar las denominadas tecnologías limpias para reducir en origen toda clase de emisiones.

Para terminar el presente apartado es obligado hacer una referencia a otros aspectos de la industria química, en primer lugar por tratarse de un importantísimo sector industrial y, en segundo lugar, por ser el sector que genera mayor cantidad de residuos, muchos de ellos de carácter especial. La descripción no puede ser, obviamente, detallada no obstante la exposición se realizará a partir de la siguiente clasificación:

- *Química básica (35%):* Agrupa las industrias destinadas a la fabricación de los productos químicos básicos y, dentro de ella es preciso distinguir:
  - Fabricación de productos químicos inorgánicos.
  - Fabricación de productos químicos orgánicos.
  - Fabricación de materias primas para plásticos.
  - Fabricación de gomas y cauchos.
- *Agroquímica (4%):* Agrupa a las empresas que tienen como actividad principal la fabricación de productos destinados a la agricultura, con los siguientes subsectores:
  - Fabricación de fertilizantes.
  - Fabricación de productos fitosanitarios.
- *Industria transformadora (61%):* Engloba a empresas que partiendo de las materias básicas produce productos para uso final y, dentro de ella es posible subdividir:
  - Fabricación de gases.
  - Fabricación de pigmentos y colorantes.
  - Fabricación de pinturas, tintas, barnices y lacas.
  - Fabricación de grasas y aceites.
  - Fabricación de jabones, detergentes y lejías.
  - Fabricación de productos de cosmética.
  - Fabricación de materias para las industrias textiles, cuero, pieles, etc.
  - Farmaindustria.

La cifra que aparece entre paréntesis corresponde al valor de la producción para el conjunto de la UE en 1990.

8.3.1. Generación y gestión de residuos en la industria farmacéutica

Durante la síntesis química en la industria farmacéutica se utilizan numerosas sustancias como materia prima, catalizadores y disolventes, tanto clorados como no clorados, que dan lugar a la generación de disolventes usados, aguas de lavado, y residuos y lodos de reactores. Como consecuencia de la extracción de productos naturales, se generan, igualmente, disolventes usados y aguas de lavado, así como la materia prima natural una vez extraída la sustancia objetivo; en los procesos de fermentación aparecen, sobre todo, tortas de filtración y lodos. Los residuos típicos de los procesos de separación y purificación contienen grandes cantidades de disolventes usados y aguas de lavado, así como las tortas de filtración.

Los residuos generados como consecuencia de la formulación de especialidades farmacéuticas, tal como se indica en la Tabla 8.42, son, principalmente, medicamentos no aptos para la comercialización

Tabla 8.42. Residuos generales por tipo de proceso

Síntesis química	Extracción de productos naturales	Fermentación	Separación y purificación	Formulación
Disolventes usados	Disolventes usados	Tortas de filtración	Disolventes usados	Medicamentos fuera de especificación y devoluciones
Aguas de limpieza de reactores	Aguas de lavado	Lodos	Aguas de lavado	Partículas captadas
Lodos de reactores	Biomasa		Tortas de filtración	Envases

(fuera de especificaciones), captaciones de polvo y material de envasado, si bien pueden aparecer también disolventes usados.

Los residuos principales del sector son los disolventes usados (destacan el metanol, el cloruro de metileno, la acetona, el tolueno, la dimetilformamida, el acetonitrilo, los xilenos, la metil isobutil cetona y el metil tert-butil éter), las tortas de filtración y las materias naturales sobrantes de la extracción de sustancias naturales. También se generan grandes cantidades de ácido clorhídrico, ácido sulfúrico y amoniaco.

Al desarrollar los procesos productivos en continuo o semicontinuo, en lugar de procesos *batch*, se consigue una mejora medioambiental, pues se disminuye el riesgo de derrames y pérdidas de materiales y se reduce la generación de residuos asociados a limpiezas y a arranques y paradas, así como a productos fuera de especificaciones.

Así mismo, la aplicación de biotecnología puede suponer ventajas en los campos donde sea posible desarrollarla, ya que la regeneración de biocatalizadores altamente selectivos es más sencilla que la regeneración de catalizadores químicos. Dada la altísima especificidad de los organismos, es posible utilizar materias primas sin purificar y diluidas en condiciones de temperatura y pH menos costosas. El proceso de fermentación es un claro ejemplo de estas ventajas. Por otra parte, existen determinados compuestos farmacéuticos, con una estereoquímica determinada, que requieren un muy alto grado de pureza, que son difíciles de conseguir con reacciones químicas habituales (producirían una mezcla de estereoisómeros), donde la sustancia objetivo debería purificarse en una etapa posterior con la consiguiente generación de productos no deseados. En estos casos puede hacerse uso de la química quiral, que utiliza biocatalizadores específicos para cada tipo de estereoisómero. Estos catalizadores son costosos, pero conllevan un rendimiento positivo tanto para las empresas como para el medio ambiente.

La gestión de envases de especialidades farmacéuticas presenta dificultades importantes en comparación con los envases de otros productos. En primer lugar, el tamaño de los envases que, en la mayoría de los casos, son pequeños; en segundo lugar, las características de fabricación de los envases se encuentran reguladas en la normativa sanitaria con objeto de garantizar su máxima seguridad, lo que impide la adopción de adecuadas medidas de prevención en su fabricación (materiales de envasado de menor grosor, materiales de fácil reciclado, etc.) y, por último, los productos, en muchas ocasiones, quedan impregnados en los propios envases, lo que dificulta y, en ocasiones, imposibilita su reuso.

8.4. VALORIZACIÓN DE RESIDUOS EN LA INDUSTRIA QUÍMICA INORGÁNICA

La industria química inorgánica comprende un número considerable de procesos. Los más importantes son las industrias del cloro, sosa cáustica, potasa, ácido sulfúrico, ácido clorhídrico, ácido nítrico, etc.

Los residuos de este conjunto de procesos se pueden agrupar en las siguientes categorías:

- Soluciones ácidas y básicas con bajos contenidos en sales y metales.
- Soluciones salinas y sales sólidas sin metales.
- Soluciones salinas y sales sólidas con metales.
- Fangos de filtración.
- Fangos y colas de destilación.
- Catalizadores, materiales adsorbentes y filtrantes, y resinas de intercambio iónico contaminadas con metales y sales metálicas.

Las soluciones ácidas, básicas y salinas se tratan mediante procedimientos fisicoquímicos de neutralización, precipitación y decantación.

Las *soluciones ácidas y básicas* pueden valorizarse al emplearse como neutralizadores mutuos, siempre y cuando no contengan otros compuestos susceptibles de sufrir reacciones colaterales indesea-

bles. Otro ejemplo de valorización lo constituye la concentración de soluciones de ácidos minerales mediante electrodiálisis.

Las *soluciones salinas* pueden valorizarse por concentración mediante ósmosis inversa, electrodiálisis e intercambio iónico, hasta llegar a concentraciones que permitan la separación y la recuperación de la sal sólida por cristalización.

Las *soluciones catiónicas* empleadas como nutrientes vegetales, como potasio o amonio, pueden neutralizarse con ácido fosfórico. Dado que el fósforo es un nutriente, las sales fosfóricas obtenidas constituirán un abono mineral.

Existen muchos productos o fracciones residuales que también son susceptibles de valorización mediante su uso como materias primas o reactivos secundarios:

- Óxido e hidróxido cálcico impurificados utilizados como reactivos de neutralización de ácidos o como agentes precipitantes de metales pesados.
- Dióxido de carbono empleado como neutralizante de álcalis.
- Cloruro sódico residual de la neutralización de gases ácidos utilizado como materia prima para la obtención de cloro, sosa cáustica, carbonato sódico, bicarbonato sódico, etc.

Las soluciones de *sales sólidas cianuradas* se caracterizan por su elevada toxicidad. Los cianuros son fácilmente oxidables en productos inocuos mediante tratamiento con hipoclorito sódico. También pueden emplearse para la descianuración otros oxidantes como: ozono, peróxidos, aire húmedo, agua supercrítica, permanganatos, etc. Asimismo, dada la facilidad de oxidación de los cianuros, un simple tratamiento térmico en atmósfera oxidante es suficiente para transformarlos en gases inocuos:

$$2CN^- + 2\ O_2 \rightarrow 2CO_2 + N_2$$

Los *residuos metálicos* pueden ser valorizables mediante intercambio iónico, electrólisis o electrodeposición catódica. Si su valorización no fuese posible, a causa de la elevada toxicidad de gran parte de los iones metálicos o por razones técnicas o económicas, deben precipitarse en forma de hidróxidos o sales insolubles. Para la precipitación primaria se emplea hidróxido cálcico, y en la precipitación secundaria se utilizan los sulfuros solubles de sodio y amonio, pues son reactivos que conjugan satisfactoriamente economía, insolubilidad y agresividad química. Los lodos obtenidos deben someterse posteriormente a un proceso de inertización previo a su vertido.

Cabe mencionar, en especial, la alta toxicidad del mercurio en forma de ión mercúrico. La forma fisicoquímica de transformarlo a su forma elemental, menos tóxica dada su inmiscibilidad en agua, consiste en la reducción de sus sales con borohidruro sódico (Na_2BH), un reactivo con una elevada capacidad reductora. El mercurio es muy volátil y, por lo tanto, susceptible de viajar grandes distancias, además de ser el metal con mayor potencialidad de bioacumularse. Por este motivo se han realizado esfuerzos para disminuir su uso, principalmente respecto a su sustitución como cátodo en las celdas de electrólisis para la producción de cloro, o bien la progresiva reducción en pilas y baterías.

Los metales contenidos en catalizadores y adsorbentes pueden recuperarse por disolución ácida y por desorción térmica (*stripping*), respectivamente. Los que están contenidos en las resinas intercambiadoras de iones pueden extraerse por disolución ácida o por regeneración de la resina primitiva mediante corriente de salmuera o baño ácido o alcalino, según el caso. Si la recuperación no es viable, debe llevarse a cabo la inertización por solidificación y su posterior vertido. La incineración es posible en el caso de resinas intercambiadoras orgánicas combustibles.

Algunos metales pesados como el mercurio, estaño, plomo o arsénico tienen la propiedad de mutilarse, lo que se ha aprovechado en la industria química para obtener compuestos con variadas aplicaciones como por ejemplo: el tetraetilplomo como aditivo en gasolinas; el etil y metilmercurio como pesticida o el tributilestaño que se emplea todavía para prevenir el crecimiento de algas en las carcasas de los barcos. Estos compuestos son lipofílicos y presentan una gran habilidad para fijarse en los tejidos de los organismos vivos lo que acrecienta su peligrosidad.

En el año 2003 la industria química básica fue la responsable de la emisión al agua del 27% del arsénico (equivalente a 2.500 kg/año) y un 26% del plomo (equivalente a 28.000 kg/año) en proporción al total de las emisiones de la industria europea. También es responsable del vertido del 22% (6.000 kg/año) de las emisiones atmosféricas de mercurio y un 53% (2.300 kg/año) de los vertidos del mismo metal al agua.

La industria química es una firme candidata a la adopción de las denominadas tecnologías limpias que, en esencia a través de cambios en los procesos de fabricación o sustitución de materias primas o ambas cosas a la vez, consiguen reducir la generación de residuos o logran que estos sean más fáciles de tratar o, en el peor de los casos, facilitan su valorización.

En numerosos procesos de cloración aparecen líquidos y gases remanentes clorados (ácido clorhídrico, hidrocarburos clorados, compuestos de cloro y cloro libre). La problemática general estriba en producir ClH exento de Cl_2. Por los sistemas convencionales ello es muy difícil de conseguir motivo por el cual se ha desarrollado una incineración para compuestos orgánicos, en los que hay una presencia importante de compuestos halogenados, en dos etapas:

- En la primera fase los residuos entran en el reactor a alta temperatura y con exceso de oxígeno.
- En la segunda etapa, la temperatura es algo superior así como el tiempo de residencia de los gases lo que garantiza la total destrucción de los gases indeseados o los inquemados.

Los gases salen de la cámara a alta temperatura y se enfrían haciéndolos pasar a través de una caldera que genera vapor de agua.

En la última fase los gases atraviesan una columna de absorción donde se condensa y recupera el ClH líquido exento de compuestos orgánicos clorados o cloro elemental y los gases limpios se emiten a la atmósfera. El proceso mencionado se puede aplicar a la industria que fabrica PVC, ya que en una de las fases de fabricación se genera ClH.

8.5. IMPACTO AMBIENTAL DE LA INDUSTRIA DE PROCESOS QUÍMICOS ORGÁNICOS

Como en el caso de la industria química inorgánica, la industria química orgánica también se caracteriza por una gran variedad de procesos y productos, por lo que se generan una gran cantidad de residuos:

- Residuos con disolventes halogenados.
- Residuos con disolventes no halogenados.
- Aguas madres, baños y soluciones fenólicas y de otros compuestos orgánicos hidrosolubles.
- Dispersiones y soluciones acuosas poliméricas.
- Colorantes, tintas, pigmentos orgánicos y sus baños de aplicación.
- Residuos de pesticidas y biocidas.

Las soluciones residuales, con separación mecánica previa de las soluciones acuosas acompañantes, son valorizables a un coste energético razonable mediante destilación. En algunos casos, como en el percloroetileno, se alcanzan proporciones de recuperación superiores al 95%. Además, se puede recuperar el cloro de los disolventes mediante el proceso de clorólisis.

La eliminación de compuestos orgánicos mediante arrastre por aire o por vapor implica su transferencia desde la fase líquida a la fase gas. El arrastre por vapor reduce aún más la contaminación del efluente y elimina un mayor número de contaminantes, aunque normalmente es un proceso más caro.

La Figura 8.48 muestra el esquema del proceso de arrastre con vapor para la eliminación de compuestos orgánicos.

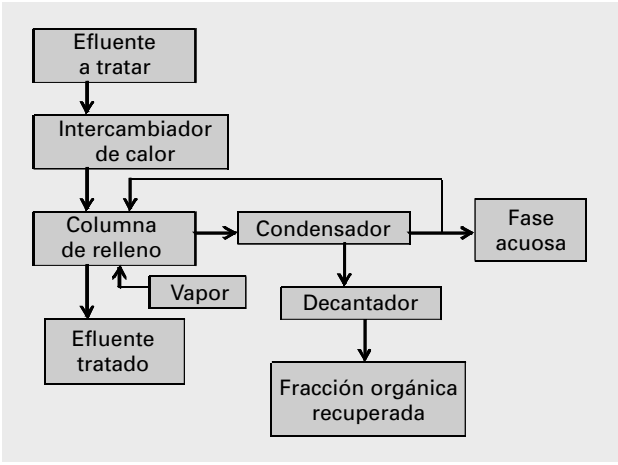


Figura 8.48. Eliminación de compuestos orgánicos por arrastre con vapor.

El proceso de arrastre con vapor, normalmente se realiza en columnas de relleno, donde el efluente entra por la parte superior de la columna y la atraviesa en sentido descendente a través del relleno, lo que precisa una gran área de contacto para la transferencia del gas. El vapor de agua entra por la parte inferior a elevada temperatura en contracorriente con el efluente, como medio de eliminación de compuestos volátiles. El vapor que sale por la parte superior de la columna es condensado, y los compuestos orgánicos son separados para su posterior tratamiento o eliminación. Una parte del condensado es normalmente recirculado por la parte superior de la columna.

La combustibilidad y los altos poderes caloríficos de los tratamientos destructivos aplicables a este grupo de productos hacen que la incineración sea el método empleado, siempre y cuando las emisiones de

los contaminantes contenidos en sus gases de combustión sean inferiores a los valores admitidos por la normativa. Este aspecto debe cuidarse especialmente en el caso de los disolventes halogenados, cuya incineración produce los hidrácidos de sus halógenos correspondientes: HCl y HF comentados anteriormente.

Las cantidades emitidas de compuestos disolventes clorados a la atmósfera son relativamente modestas: entre un centenar de toneladas en el caso del tetracloruro de carbono hasta algunos miles de toneladas en el caso del diclorometano y el dicloroetileno. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que la capacidad de la molécula de tetracloruro de carbono para producir efecto invernadero es equivalente a 1.300 veces la del CO_2 en un horizonte de 100 años, por lo cual, la contribución de estas emisiones al calentamiento global es importante.

Las *aguas madres, los baños y las soluciones líquidas fenólicas y de otros compuestos hidrosolubles* pueden valorizarse energéticamente si la concentración en sustancias combustibles es suficiente. Una posible vía de valorización material consiste en la absorción en resinas, que permiten su regeneración y la recuperación del producto. Los tratamientos fisicoquímicos destructivos aplicables a estos productos se basan en su oxidación, que puede ser biológica, con ozono, aire húmedo, peróxidos, etc. Si es preciso estos productos a nivel trazas (por ejemplo, en potabilización de aguas), debe recurrirse a la adsorción con carbón activo.

Las *dispersiones y soluciones poliméricas* no son valorizables debido a la imposibilidad de retrogradar la polimerización. La baja concentración en sustancias orgánicas combustibles implica que para su incineración directa sea necesaria la concentración previa del residuo. Debido a su semejanza con las emulsiones, las dispersiones y soluciones poliméricas pueden tratarse por separación de fases mediante rotura de la estabilidad de la emulsión con empleo de electrolitos. De esta forma, se obtienen dos fases: una acuosa, que precisará tratamiento en EDAR, y una orgánica, que se podrá incinerar o inertizar.

En principio, los *pesticidas y biocidas* no son valorizables, ya que son muy estables químicamente y no biodegradables. Además, su incineración es problemática por una parte debido a su bajo PCI y otra a su toxicidad que se debe precisamente a la presencia en sus moléculas de elementos tóxicos de *per se*: halógenos, fósforo, metales pesados, etc., cuya incineración da lugar a productos también tóxicos. Se deben estudiar y resolver estos efectos adversos en el caso de emplear esta vía de destrucción, desestimándose en caso de duda.

8.5.1. Problemática particular de los COP

Algunos insecticidas clorados son derivados ciclodiénicos como el aldrín, endrín y mirex, los cuales se comercializaban en la década de los años 50 del siglo pasado. Actualmente buena parte de dichos insecticidas están prohibidos o sujetos a fuertes restricciones de uso en los países occidentales.

Los compuestos orgánicos tóxicos y persistentes son generalmente poco volátiles; pero lo suficientemente volátiles como para evaporarse en las zonas calientes del planeta como los trópicos y subtrópicos, lo que les permite desplazarse a latitudes mayores y más frías donde se depositan en el suelo y en los reservorios hidrosféricos. Las bajas temperaturas favorecen la adsorción de los contaminantes en las partículas sólidas en suspensión de la atmósfera y también incrementa la estabilidad de las moléculas contaminantes y su persistencia en el medio.

Dentro de los compuestos orgánicos industriales se encuentran los difenilpoliclorados (PCB) utilizados ampliamente como fluidos industriales, material dieléctrico, fluido intercambiador de calor, disolvente, plastificante, recubrimientos, etc. Esta familia está compuesta por 209 componentes distintos según el grado de cloración de la molécula de difenilo, además de los isómeros existentes. La toxicidad de los PCB's depende del grado de cloración y de la posición de los átomos de cloro en la molécula; los componentes más tóxicos pueden provocar, entre otras perturbaciones, diversas disfunciones en el hígado, la piel y en el aparato reproductor. En la actualidad su fabricación está totalmente prohibida; sin embargo todavía se encuentra mucho PCB disperso y en uso por lo que su presencia es importante.

Uno de los sustitutos de los PCB son las parafinas policloradas (PC) que se clasifican según la longitud de la cadena hidrocarbonada en: cadena corta (10 a 13 carbonos), de cadena media (14 a 17 carbonos) y de cadena larga (de 17 a 30 carbonos). Sus moléculas contienen cloro sustituyente entre un 10 y un 70% de los átomos de hidrógeno. Estas sustancias se vienen fabricando en grandes cantidades desde el primer tercio del siglo pasado y se utilizan principalmente como sustancias ignífugas y aditivos de pinturas.

Otros compuestos relativamente problemáticos son los difenil ésteres polibromados (DEPB) que también se emplean como material ignífugo y que

sustituyeron gradualmente a los difenil polibromados. Los DPEB son sustancias muy lipofílicas, tanto más cuanto mayor es el grado de bromación de sus moléculas y bastantes persistentes en el tiempo.

Una problemática común entre los DPEB y los PCB es que en su combustión se generan dioxinas y furanos, si bien este es un problema completamente resuelto en los incineradores, tanto de residuos urbanos como industriales.

La Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (UNECE) desarrolló un protocolo para identificar a las sustancias como Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP) en función a las siguientes características de los compuestos:

- Capacidad de sufrir transporte atmosférico fronterizo; para lo que su presión de vapor ha de ser inferior a 1.000 Pa y tener una vida media en la atmósfera mayor a dos días y/o que se disponga de evidencias que la sustancia haya sido detectada en lugares remotos.
- Toxicidad con capacidad de afectar negativamente a la salud humana y/o al medio ambiente.
- Persistencia: que la vida media del compuesto sea mayor a dos meses en la hidrósfera, mayor a seis meses en el suelo o en sedimentos, o alternativamente, si se considera suficientemente persistente como para causar problemas.
- Bioacumulable: si el factor de bioconcentración del compuesto (relación, en el equilibrio, entre las concentraciones del compuesto en fase lipídica y el agua) es mayor a 5.000 o el log KOA (constante de reparo octanol – agua) es superior a 5. Alternativamente, si el factor de bioacumulación es significativamente menor a 5.000 el compuesto también se considera bioacumulable, siempre y cuando manifieste una elevada toxicidad dentro del marco del protocolo.

Este protocolo fue aprobado por 123 países en el año 2000 en una reunión de la UNECE en la que también se identificaron 12 compuestos orgánicos para los que se definieron medidas de control en su producción, importación, disposición y uso. Estos compuestos son:

- Insecticidas clorados:
  - Aldrín.
  - Clordane.
  - DDT.
  - Dieldrín.
  - Endrín.
  - Heptaclor.
  - Mirex.
  - Toxafeno.
- Compuesto químico industrial:
  - PCB.
- Subproductos:
  - HCB.
  - DDPC.
  - DFPC.

Un compuesto de origen similar a las dioxinas son los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH por su sigla en inglés) que de igual manera se producen como subproductos a partir de reorganizaciones moleculares, en particular los procesos de combustión. Estos compuestos están agrupados en diferentes núcleos bencénicos fusionados unidos por dos o más átomos de carbono.

8.5.2. Biodegradación de asfaltenos mediante técnicas de compostaje-vermicompostaje

El año 2002 el petrolero «Prestige» sufrió un accidente frente a las costas de Galicia (España) que provocó una marea negra que afectó, además de Galicia, Asturias, Santander y el Golfo de Vizcaya (en España) y a Portugal. En busca de alternativas de tratamiento la Universidad de Valladolid realizó múltiples estudios enfocados a la biorremediación del problema de contaminación. Se emplearon procesos de bioestimulación (mediante la adición controlada de nutrientes) y bioaumentación (mediante la utilización de microorganismos exógenos).

Debido al paso del tiempo el fuel oil de los vertidos se ha enriquecido en componentes con estructuras moleculares más complejas tipo hidrocarburos heterocíclicos de base nitrógeno-oxígeno-azufre conocidos como asfaltenos. Estos compuestos generalmente están unidos a resinas, parafinas y otros hidrocarburos complejos.

La degradación espontánea de los asfaltenos en la naturaleza es muy lenta y sólo se produce cuando están presentes microorganismos procedentes de sedimentos u otras fuentes naturales; por lo que se hace necesario incorporar diferentes sustratos que permitan la introducción de microorganismos exógenos necesarios para iniciar un proceso de biorremediación.

El compostaje es un proceso microbiano aeróbio que ha sido utilizado para la degradación de resi-

duos orgánicos y que, por sus ventajas medioambientales, se presta para la eliminación de residuos petrolíferos de suelos contaminados; y además de eliminar los contaminantes se obtiene un producto de alto valor agronómico que permitirá revalorizar los suelos contaminados.

La adición de cosustratos metabólicos como restos de «cama da vaca» y peladuras de patata permiten la fragmentación de los compuestos más complejos en estructuras más sencillas susceptibles de posteriores degradaciones. Después del primer compostaje se hace necesario un proceso de maduración mediante tratamiento por vermicompost utilizando lombrices *Eisenia foetida foetida*. Con este sistema se ha llegado a obtener un producto final revalorizado, útil en procesos para enmienda de suelos y con escasa presencia de asfaltenos e hidrocarburos aromáticos policíclicos, rico en humus y con una importante flora bacteriana del género *Bacillus*, típica de productos coactivadores y aceleradores del proceso de compostaje.

8.5.3. Valorización energética de residuos sólidos, líquidos y pastosos contaminados con hidrocarburos

Para el caso de los residuos líquidos es frecuente emplear una balsa de decantación para las mezclas agua-lodo-hidrocarburo; posteriormente se tiene una línea de separación de aguas-hidrocarburo y una línea de tratamiento de la fase líquida combustible que se compone del sistema de calentamiento, filtros de luz inferior a 1 mm (filtro grueso) y filtro fino (60/30 micras).

Para los residuos sólidos (residuos orgánicos pastosos, ceras, grasas y ceras usadas, emulsiones no cloradas, lodos de hidrocarburos, restos de combustibles, asfaltos y alquitranes) el proceso de muestra en la Figura 8.49.

8.6. RECUPERACIÓN DE TRICLOROETILENO Y ETANOL

En la fabricación de pinturas queda un agua residual rica en disolventes, que a veces se concentra hasta el estado de fangos o pastas. El agua contaminada se introduce en un reactor donde se evapora, para más tarde condensar los vapores y se procede a la separación de los componentes. La recuperación de disolventes es una práctica común en la mayoría de industrias que los usan en los procesos.

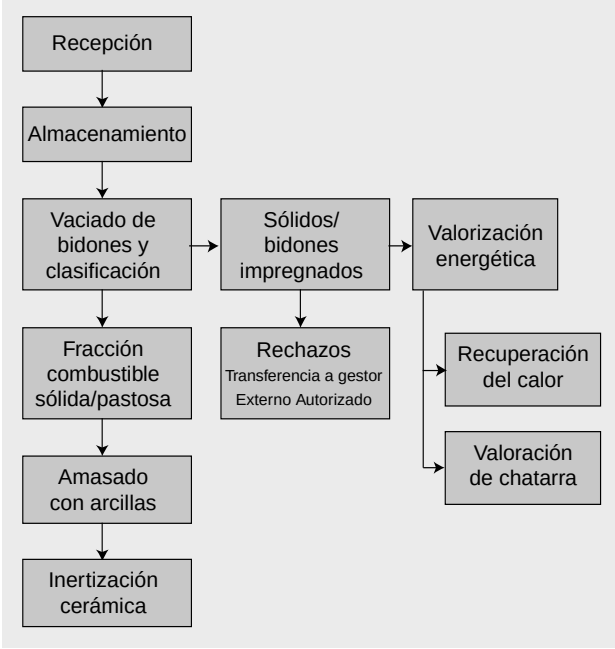


Figura 8.49. Proceso de valorización de residuos sólidos y pastosos con hidrocarburos.

En los procesos de secado de pastas el aire vaporiza compuestos de baja temperatura de destilación, como ciertos COV's y alcoholes. El proceso está representado en la Figura 8.50.

La recuperación de los disolventes se lleva a cabo en una planta de adsorción. Esta se realiza en una columna en contracorriente de gas de escape y glicoleter como líquido de lavado. El líquido contaminado se calienta y regenera en una columna de desorción y con agua para el arrastre (*stripping*).

Los disolventes aparecen como producto de condensación y se recuperan por separado: el etanol y el tricloroetileno.

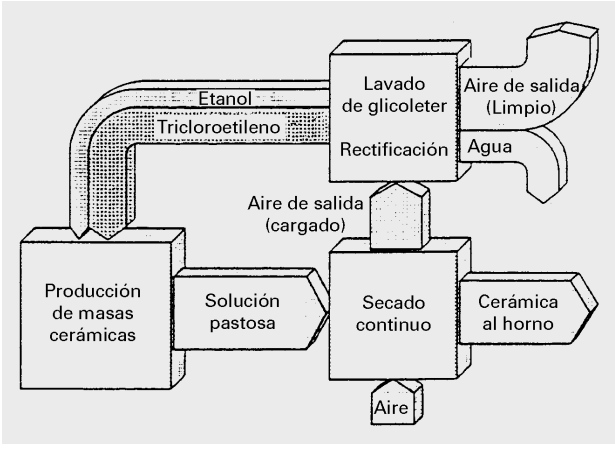


Figura 8.50. Valorización de COV´s y alcoholes.

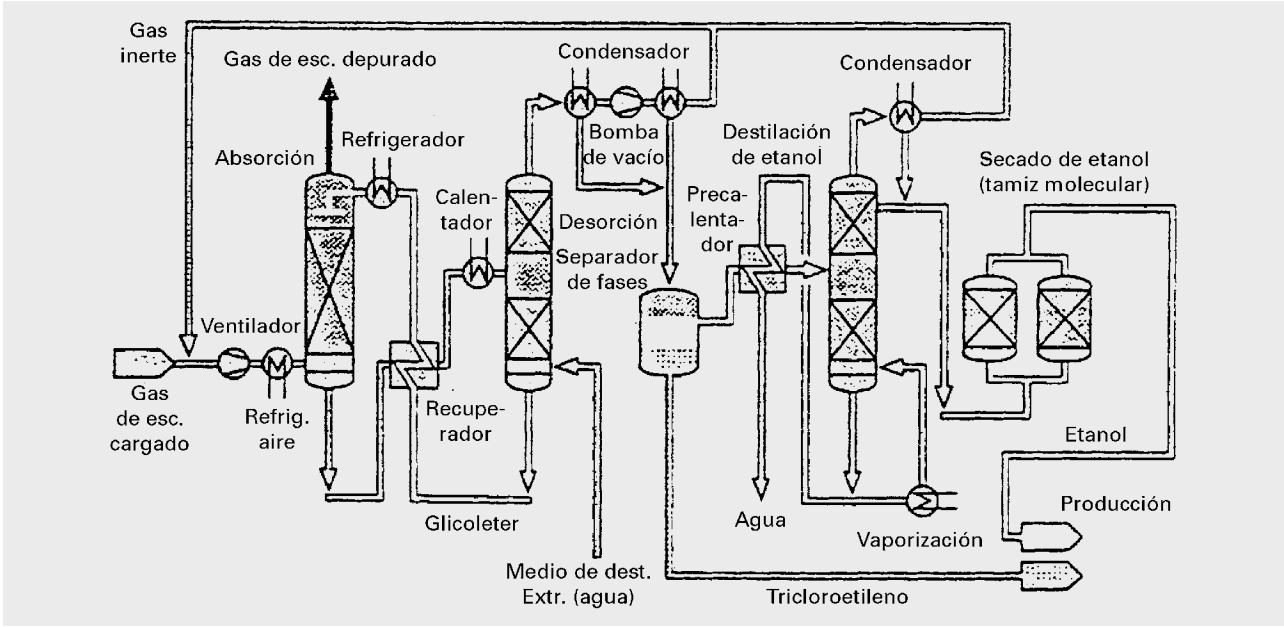


Figura 8.51. Valorización de tanol y tricloroetileno.

8.7. SUBPRODUCTOS EN LA FABRICACIÓN DE MATERIALES PLÁSTICOS

En general la producción del monómero genera más residuos que la del polímero. Los principales monómeros son:

- Celulósicas.
- Vinílicas.
- Estirénicas.
- Poliolefinas.
- Acrílicas.
- Poliesteres.
- Urea.
- Fenólicas.

Obviamente cada una de estas industrias, productoras de materias primas para plásticos, genera una gama diferente de residuos, algunos de ellos con claras posibilidades de valorización, como es el caso de las poliolefinas.

En la fabricación de poliolefinas, básicamente polietileno (PE) y polipropileno (PP), se generan una cantidad notable de residuos en forma de gases, líquidos y fangos, algunos de los cuales tienen posibilidades de recuperación.

El proceso básico de síntesis consiste en la polimerización en una disolución relativamente ligera. La aparición de nuevas generaciones de catalizadores hace posible el abandono progresivo de disolventes y, por tanto la generación de aguas residuales.

En algunas plantas la fracción líquida y gaseosa (en muchos casos mezclas de agua/bencina) se quema en una caldera para la generación de vapor.

En otras plantas, como la que muestra la Figura 8.52, la fracción tanto líquida como gaseosa con presencia de gasolina se somete a procesos de adsorción, condensación y rectificación hasta obtener bencina en estado puro que se recupera como materia prima. Los vapores residuales son incinerados.

8.8. LA PROBLEMÁTICA DE LA FABRICACIÓN DE PRODUCTOS FITOSANITARIOS

Sería injusto achacar a los productos fitosaniatrios todos los graves impactos ambientales que padecen muchos campos de cultivo y muchísimos acuíferos. Si bien es cierto que en tiempos no muy lejanos, se veían los productos fitosanitarios como la tabla de salvación para la multiplicación de las cosechas y su aplicación se incrementó hasta extremos inverosímiles, también es cierto que cuando comenzaron a encenderse las alarmas que señalaban a los fitosanitarios como uno de los causantes de las alteraciones medioambientales, las autoridades pusieron límites a su uso. En la actualidad hay muchos productos básicos prohibidos.

El efluente más conflictivo en la obtención de productos químicos necesarios para la fabricación

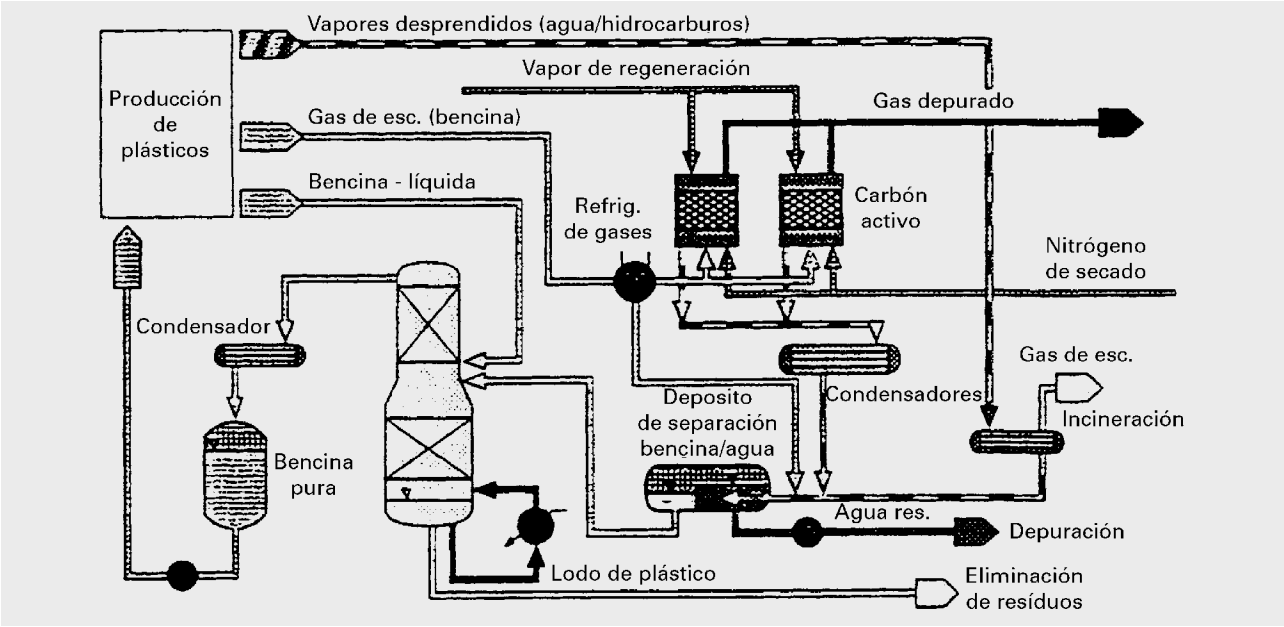


Figura 8.52. Recuperación de gasolina.

de insecticidas, herbicidas, plaguicidas, etc., es el diclorofenol (DCP). Su tratamiento es complicado. En principio se hacia pasar la corriente residual por un filtro de carbón activo con un coste elevadísimo.

El proceso alternativo consiste en la cloración alcalina, que permite reducir el DCP en más del 95%, con todo los efluentes continúan siendo muy conflictivos ya que, pese a ser el DCP un compuesto fenólico no puede ser oxidado biológicamente como el fenol.

El otro gran insecticida es el dicloro-difenil-tricloroetano (DDT) cuya fabricación hace años que está prohibida en los países industrializados. Debido al proceso de fabricación los efluentes contienen una cantidad importante de ácido que debe ser neutralizado con carbonato sódico.

Los ácidos carboxílicos aromáticos son productos intermedios en la fabricación de fitosanitarios. Hoechst ha desarrollado un sistema de oxidación que minimiza la generación de residuos.

Básicamente la oxidación de los aromatos alquílicos se lleva a cabo en aire con ácido acético como disolvente y en presencia de catalizadores. El catalizador y la materia filtrada (ácidos carboxílicos aromáticos) se devuelven al proceso. Sólo el agua de reacción se debe depurar y una ligera parte se incinera, como muestra la Figura 8.53 (que indica los flujos de cada reactivo y producto en volumen).

8.9. RESIDUOS EN LA FABRICACIÓN DE PINTURAS, BARNICES Y LACAS

El proceso general de fabricación consiste en mezclar pigmentos y cargas con un aglomerante (una resina o un polímero) que le de consistencia. Durante el proceso los diversos reactores, mezcladores o líneas de envasado liberan vapores en forma de efluentes gaseosos. Estos deben ser condensados y tratados en la depuradora, adsorbidos en carbón activo o bien incinerados.

Los efluentes líquidos son generados como subproductos en los fondos del condensador, las aguas de lavado y aguas con disolventes y metales pesados. La tendencia moderna se inclina hacia la fabricación de pinturas con base agua (en lugar de base disolvente), ya que los impactos tanto en la fabricación como en la aplicación son menos conflictivos.

Un ejemplo de ello es la posibilidad de reciclar lacas («overspray») en las cadenas de pintura de automóviles, que se recogen mezcladas en agua de las cortinas de las cabinas de pintura.

A esta agua circulante se le añade más laca y de esta manera es posible reaprovechar cerca del 95% del material.

Un problema ambiental relacionado con las pinturas y sus derivados es la gestión de los envases, tanto si estos están ya vacíos como la gran cantidad de envases que contienen pintura defectuosa, cadu-

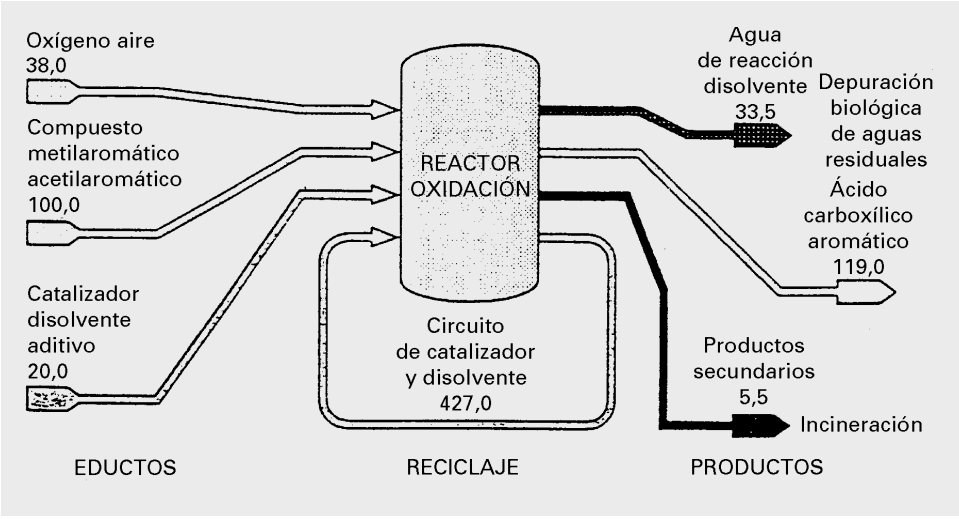


Figura 8.53. Valorización de carboxílico aromático.

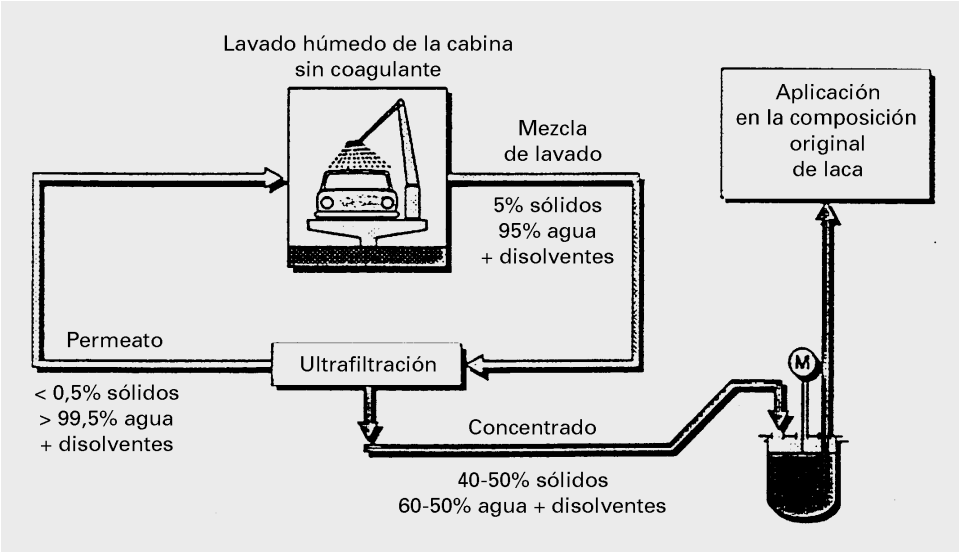


Figura 8.54. Recuperación de disolventes en pinturas.

cada o pasada de moda. Una solución consiste en usarla para la formulación de las llamadas pinturas de primera capa.

8.10. APROVECHAMIENTO DE REMANENTES EN LA PRODUCCIÓN DE LANA CELULÓSICA

En la fabricación de las fibras celulósicas se generan residuos con gran cantidad de material celulósico biodegradable, sulfatos y metales pesados. El tratamiento convencional estriba en la neutralización de los ácidos y la precipitación de los metales pesados. La celofana residual suele incinerarse.

En las fases de lavado de las fibras aparecen sulfuro de carbono y sulfuro de hidrógeno. El sulfuro de hidrógeno se separa del gas de escape por medio de diversos lavados con hidróxido de sodio. Más tarde se adsorbe en carbón activo.

El producto de la desorción (vapor de agua/vapor de sulfuro de carbono) se condensa y finalmente se recupera todo el CS_2 en una etapa de *stripping*.

8.11. TRATAMIENTO Y SUSTITUCIÓN DE LOS CFC's

Desde la década de los años 30, industrias tan relevantes como la electrónica, la refrigeración, los aerosoles o los plásticos han usado los clorofluorocarbonos (CFC's) para aplicaciones tan diversas como los disolventes, refrigerantes, propelentes o espumantes respectivamente.

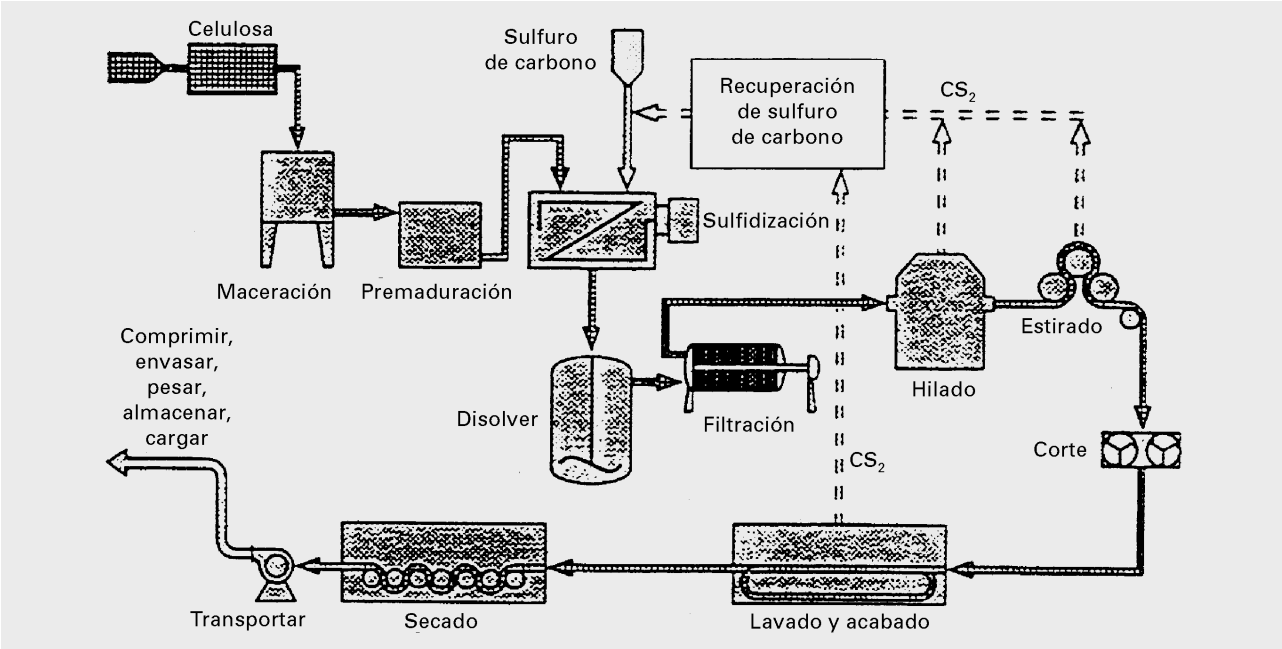


Figura 8.55. Valorización de lana celulósica.

Los CFC's son compuestos extremadamente estables, que han mostrado su poder destructivo frente a la capa de ozono estratosférico que nos protege de los rayos ultravioletas del sol. Se ha comprobado que cada radical de cloro puede descomponer alrededor de 100.000 moléculas de ozono.

En la actualidad los esfuerzos de la industria química se centra en la búsqueda de sustitutos para las aplicaciones como refrigerantes ya que los otros sectores han encontrado fácil sustituto. Los productos alternativos parecen cumplir las funciones refrigerantes, sin provocar alteraciones significativas de la capa ozono. Los más destacados son:

- Hidroclorofluorocarburos (HCFC's).
- Hidrofluorocarburos (HFC's).

La descontaminación de los fluidos frigoríficos presentes en los aparatos refrigeradores contaminados se lleva a cabo por depuración mecánica y recuperación por destilación.

Cuando los gases son extraídos de los equipos refrigerantes en desuso son envasados en recipientes herméticos y llevados a incinerar. La compañía Hoechts tiene un sistema patentado para disociar los hidrocarburos clorados y fluorados y transformarlos en ácidos clorhídrico y fluorhídrico (ver Figura 8.56).

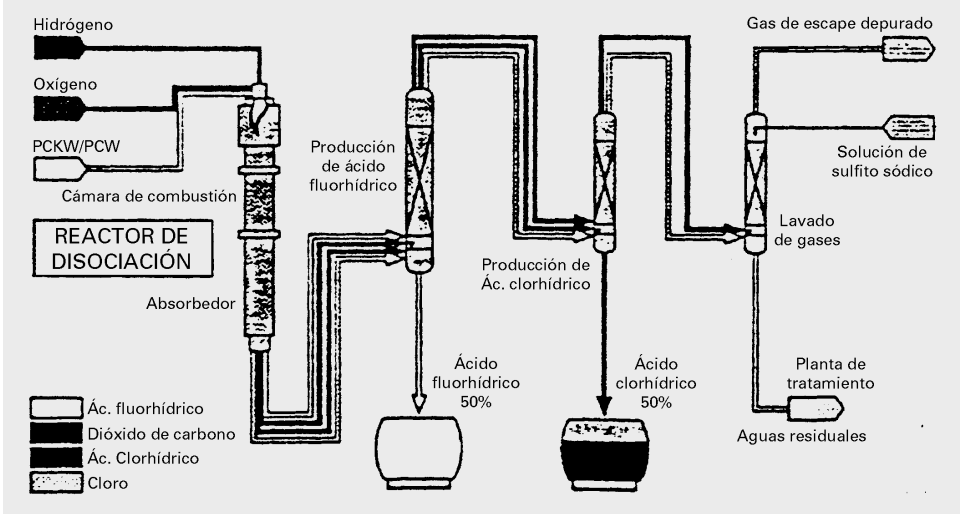


Figura 8.56. Separación de hidrocarburos clorados y fluorados.

En la actualidad, la USEPA, está trabajando en la sustitución del azufre hexafluoride (SF6), muy usado para prevenir la oxidación de metales. Se trata de un gas de potente efecto invernadero.

8.11.1. Algunos tratamientos y alternativas para los HFC

Los CFC son los actuales sustitutos de los HFC, PFC y SF_6, sin embargo todos ellos han revelado con importantes carencias desde el punto de vista de la protección de la capa de ozono. Con la entrada en vigor del Protocolo de Kyoto se han redoblado los esfuerzos para encontrar sustitutos a los CFC o, en su defecto, hallar vía respetuosas con el medio ambiente para la destrucción de los mismos.

Durante la fabricación del HCFC-22 (clorodifluorometano: $CHClF_2$) que se emplea para aditivos en resinas y como refrigerante, se genera también HFC-23 (trifluorometano: CHF_3), gas de potente efecto invernadero y que se descompone a alta temperatura. Para ello se ha desarrollado un sistema de combustión sumergida donde los gases superan los 1.200℃ y luego sufren un enfriamiento rápido para evitar la reformación de dioxinas y furanos.

El HCFC-22 se emplea como líquido refrigerante en los climatizadores domésticos y comerciales. En 2000 se usaron más de 800 toneladas, y de acuerdo con la «*Ozone Layer Protection Law*», su consumo ha de reducirse en un 35% en 2004. Ello implica que debe recuperarse y reciclarse. En la actualidad, se esta llevando a cabo una purificación, una vez recuperado, para volver a usarlo como refrigerante.

La Tabla 8.43 muestra los nuevos compuestos que con unas propiedades semejantes a los CFC, no crean problemas de destrucción de la capa de ozono ni efecto invernadero.

Tabla 8. 43. Nuevos CFC y sus campos de aplicación

Aplicación industrial	Nuevo CFC
Refrigerante	HFE – 143 m
Limpieza industrial	HFE – 347 pc-f
Agente espumante	HFE – 254 pc
Semiconductor / Fabricación LCD	C_xF_y, CF_3I, COF_2
Aislamiento de equipos de potencia	CF_3I
Agentes contra incendios	CF_3I

8.12. QUÍMICA Y DESARROLLO SOSTENIBLE

A ojos del lector poco conocedor del mundo de la química, parece que la química fina (los fabricantes de medicamentos, productos farmacéuticos, laboratorios, etc.) deberían ser los ejemplos a seguir en términos de sostenibilidad. Sin embargo, desde el punto de vista estricto de la generación de residuos, en muchos casos la relación producto/residuo es 1/99, siendo frecuente el 10/90, es decir por cada kg de material fabricado se generan 99 de residuos, lo mismo que acontece en la industria minera metálica que se tiene, en contraposición a la química fina, como el arquetipo de la contaminación ambiental.

Sin entrar en la discusión de los rendimientos efectivos, esta valoración solo pueden llevarla a cabo los especialistas en el tema, es fácil deducir que la extracción de una esencia o principio activo representa una mínima parte de la materia de la cual se ha partido, No obstante, el residuo suele salir razonablemente seco y ello da pie a la valorización energética puesto que mayoritariamente es de naturaleza orgánica. Así pues, mientras la investigación no logre la minimización de los residuos, el aprovechamiento integral de los residuos debería ser la meta a corto plazo.

La Figura 8.57 muestra de forma esquemática los posibles puntos de mejora en el proceso de elaboración de un compuesto químico, con el fin de hacerlo ambientalmente más amigable. De esta manera se debe partir del diseño de la molécula con criterios ambientales (ecodiseño) en el que se prevea un mínimo impacto sobre el entorno natural buscando que sea biodegradable y que disponga de un corto periodo de vida.

Durante el proceso deberá tenderse al uso de catalizadores de larga vida que faciliten el proceso químico a un ritmo suficientemente alto y en condiciones experimentales suaves de poco consumo energético. También se deberá evitar, de ser posible, el uso de disolventes y otros compuestos auxiliares procurando desarrollarlo con el menor número posible de etapas intermedias.

Otro campo con muchas posibilidades se refiere al uso de recursos renovables mediante la obtención de biopolímeros. Una de las primeras propuestas en este sentido fue la obtención de polihidroxialcanoatos a través de la fermentación de una disolución de glucosa en presencia de determinadas bacterias. El interés en estos biopolímeros responde a su alta biodegradabilidad y a la posibilidad de sustituir a mate-

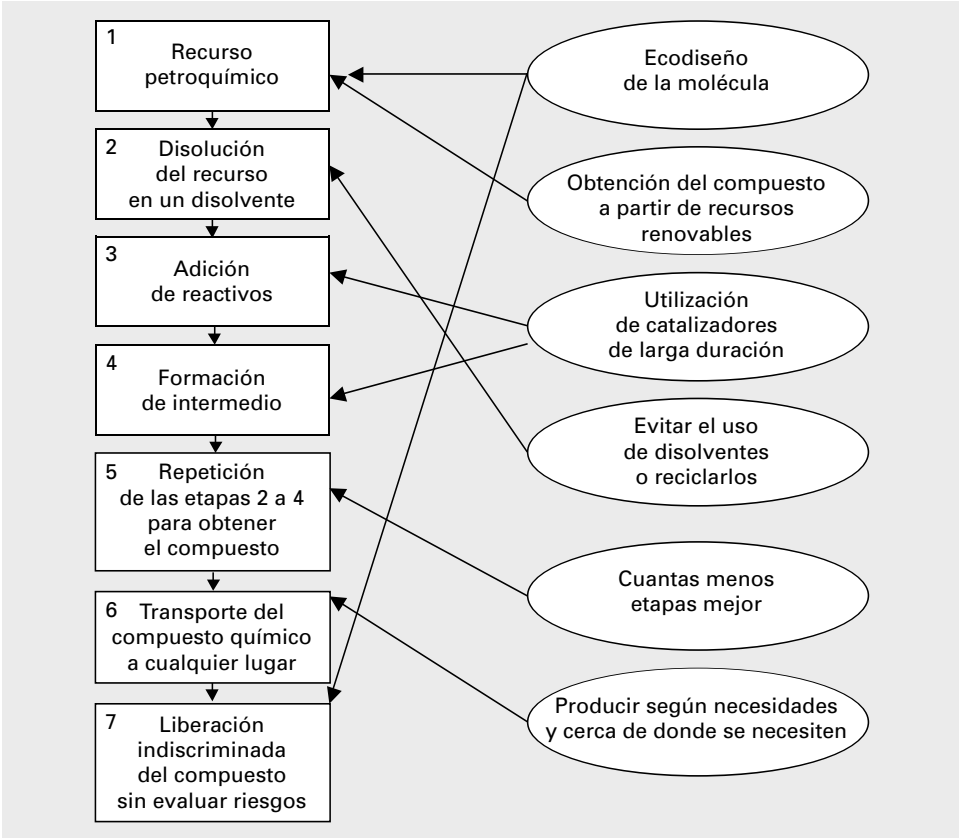


Figura 8.57. Algunas estrategias para una química más limpia (Doménech, 2000).

riales plásticos muy utilizados como el polietileno o el polipropileno.

Para contrarrestar la problemática asociada al uso de disolventes orgánicos volátiles actualmente se tiene las siguientes alternativas:

- Sistemas reactivos «sin disolventes».
- Inmovilización de disolventes.
- Líquidos iónicos.
- Disolventes bifásicos.
- Disolventes inocuos y renovables (CO_2 y H_2O).

Recientemente, en 2004, se ha inaugurado en Valencia (España) una planta dedicada a la extracción de esencias botánicas que no recurre al uso de disolventes tradicionales, tan solo emplea algo de alcohol y agua, de esta manera evita cualquier atisbo de contaminación.

9. Valorización de escombros de firmes de carreteras y construcción

La constante renovación de carreteras y pistas asfaltadas conduce a una cantidad de escombros de claro potencial de reutilización. En una primera etapa esta clase de escombro se utilizó, previa clasificación de tamaño, para rellenos y cimientos (en sustitución de gravas y áridos). Más tarde algunos países, como Suiza, han elaborado algunas normas donde se establecen las bases para la valorización de dichos escombros y su transformación en granulados (así se denomina el material recuperado y triturado de manera que el tamaño de grano máximo no rebase los 32 mm) para su aplicación en nuevos firmes.

Siempre que sea posible, el material recuperado debe ser procesado en caliente. Esta es la manera más lógica de proceder ya que las propiedades ligantes del asfalto solo pueden ser recuperadas si se utiliza un proceso en caliente. Este sistema no solo reutiliza el material, sino que ahorra una gran cantidad de betún nuevo.

En cualquier caso la valorización de firmes debe pasar por una reflexión concerniente al impacto ambiental que puede suponer la reutilización indiscriminada de todo tipo de residuo conteniendo asfalto.

• Reciclado de escombros con bajo contenido en alquitranes, como los hormigones asfaltados o cimientos mixtos de alquitranes hechos en caliente. En este caso solo se prevé una ligera contaminación del agua y el suelo. Con las modernas máquinas de aplicar el granulado no se espera ningún tipo de contaminación atmosférica.

• El reciclado de escombros con alto contenido en alquitranes, como superficies alquitranadas o impregnaciones con betunes alquitranados, puede representar un impacto ambiental importante. La única justificación de su uso, a partir de granulados, se halla en la aplicación, en frío, con ligantes bituminosos.

La Figura 8.58 muestra la diferencia en la construcción de una autopista convencional con respecto a la realizada (la N1 Suiza) con materiales reciclados. En otro orden de residuos pero referidos a la misma aplicación se halla la valorización de los residuos finales del reciclaje de los aceites de automoción.

En el proceso de valorización de los aceites usados de automoción por el sistema de destilación fraccionada se genera un residuo final, denso, casi sólido, de naturaleza asfáltica, ya que está compuesto por hidrocarburos de cadena larga.

Este residuo es perfectamente compatible con la mezcla asfáltica a aplicar en los firmes de carretera. De hecho, en Cataluña, existen ejemplos de aplicación sin que hayan comportado problemas técnicos ni ambientales.

9.1. APLICACIÓN DE LOS NEUMÁTICOS USADOS A LA FABRICACIÓN DE ASFALTOS PARA FIRMES DE CARRETERAS

En los últimos años se han llevado a cabo muchos intentos de valorización de neumáticos usados para su aplicación a la fabricación de asfaltos para firmes. Para ello los neumáticos se trituran y se añaden tanto al asfalto como a los aglomerados de base que forman el pavimento de una carretera. La mezcla suele realizarse in situ a una temperatura de 375℃.

La cantidad de neumático, triturado, usado es del orden del 3% (se trata de la denominada vía húmeda), lo que supone, para una carretera de dos pistas el empleo de 7.000 neumáticos por kilómetro. Las principales características que presenta un asfalto fabricado con polvo de neumático, frente a uno convencional, son:

- Mayor resistencia mecánica (del orden del 70%).
- Reducción del nivel del ruido del tráfico, en un 60%.
- Disminución del desgaste de los neumáticos hasta en un 25%.
- Mayor durabilidad, hasta el doble, del firme.
- Mejora de las propiedades antideslizantes.
- Más compacidad o menor fragilidad al agrietado provocado por las diferencias de temperatura ambiente, lo que reduce la partida de mantenimiento.
- Mejora de la impermeabilización de la superficie pavimentada, evitando la penetración del agua, lo que suele acarrear consecuencias nefastas en las épocas del año en las que el agua infiltrada, al helarse, aumenta de volumen.
- Mayor flexibilidad con lo que estos pavimentos soportan mejor los esfuerzos mecánicos a que se ven sometidos.

Frente a estas claras ventajas técnicas, se presentan unas limitaciones de índole económica que pue-

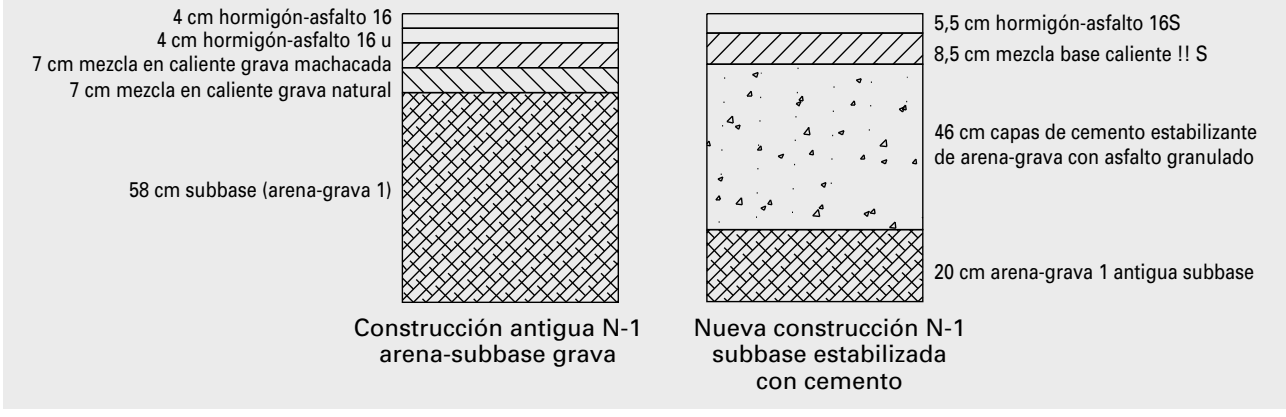


Figura 8.58. Construcción de una carretera con material reciclado.

den sintetizarse en el coste de la preparación del polvo de neumático.

En resumen la valorización de los neumáticos usados pasa por dos grandes apartados: la desvulcanización y la trituración.

- *Desvulcanización:* Consiste en la rotura de los enlaces S-S del polvo de caucho, que puede llevarse a cabo mediante procesos térmicos o químicos y tiene como finalidad recuperar las propiedades del caucho original. Los pocos sistemas que existen son caros y no están desarrollados industrialmente.
  Por tanto la vía de valorización industrial de los neumáticos usados se limita a la trituración.
- *La trituración*: de los neumáticos, por el carácter elástico del caucho, requiere un aporte de energía muy elevado, puesto que buena parte de la energía, suministrada por la trituración, se invierte en la deformación plástica del material, mucho antes de llegar al punto de fractura. Durante el proceso de trituración el material se calienta, aumentando, a su vez, su ductilidad y haciendo necesario la aplicación de una energía suplementaria. Además la presencia de cable de acero en el seno del neumático origina problemas de desgaste en las máquinas de corte.

Existen otras alternativas que se especifican en el Capítulo 14 de esta obra.

9.1.1. Características del polvo de neumático

El polvo de neumático no conserva las propiedades del caucho virgen como consecuencia del proceso de vulcanización a la que se sometió el caucho durante la fabricación del producto. Pero ello no puede ser reutilizado directamente para la producción de neumáticos.

El polvo está formado por una mezcla de diferentes tipos de cauchos vulcanizados, con una estructura química estable. Ello supone una baja reactividad que dificulta su posterior reprocesamiento. Las plantas de trituración tratan neumáticos de diversa procedencia, tamaños y fabricantes, con lo que resulta imposible garantizar una composición química estable. Tanto es así que lo invalida para reemplazar al caucho virgen ni siquiera en una pequeña proporción. La sustitución de cargas, caolín o sílice, por polvo tampoco es interesante ya que el coste de trituración es muy superior al de las citadas materias primas.

La molienda criogénica se basa en la reducción de la energía de deformación con la temperatura. Ello permite rebajar la energía precisa para la fractura, disminuir el efecto de rebote en el interior del molino y reducir el desgaste por abrasión.

Trabajando a una temperatura comprendida entre –90 y –170 ℃, se consigue un polvo más fino y con menos impurezas. Por lo general se emplea la tecnología del nitrógeno líquido. No obstante el consumo y el coste es alto ya que se calcula que cada kilogramo de neumático precisa del orden de 1 kg de N_2 líquido.

9.2. RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN DE HORMIGÓN PARA FIRMES DE RODADURA

El desarrollo creciente y acelerado de la sociedad demanda el consumo de ingentes cantidades de materias primas. Así por ejemplo, para el año 2002 el consumo de áridos para construcción alcanzó en España los 451 millones de toneladas anuales, de los que 379 millones se emplean directamente en la construcción. De esta cantidad sólo el 2% (7,6 millones de toneladas) proceden de algún proceso de reciclaje. En el Capítulo 14 de esta obra se habla extensamente de las posibilidades y caracterización de los RCD para obras en general, en el presente apartado solo se citan su posible aplicación a los firmes de carretera.

Los residuos de construcción y demolición (RCD) son generados a lo largo de toda la vida de una edificación, por decisiones y actuaciones en el propio proyecto, durante la ejecución de las respectivas unidades de obra de construcción o mantenimiento y finalmente como resultado de su demolición.

Para poner un ejemplo, en un único vertedero ubicado en Sevilla (España), la cantidad de residuos tipo RCD, en el año 2000, alcanzaron las 50.000 m^3/mes con una distribución porcentual que se muestra en la Tabla 8.44 en la que destaca la importancia de los materiales cerámicos, hormigones y morteros que llegan a suponer el 57% de los RCD, lo que da una idea de su reciclabilidad.

En general, el árido obtenido por triturado de RCD tiene algunas desventajas físicas y mecánicas con respecto a los áridos naturales, debido a que es un árido compuesto por dos o más materiales con ca-

Tabla 8.44. Composición porcentual de los RCD

Material principal	Porcentaje (%)
Cerámicos	44,0
Hormigones	13,0
Tierras	15,0
Maderas	10,0
Plásticos	7,0
Yesos	3,0
Metales y aleaciones	5,0
Vidrios	1,0
Otros	2,0
TOTAL RCD	100,0

racterísticas diferentes y otros inconvenientes físicos tales como la porosidad, absorción de humedad, baja densidad, etc.

Sin embargo, pruebas realizadas en centros de investigación y universidades españolas plantean la posibilidad de reemplazar parte del árido que se emplea para fabricar hormigón por residuos procedentes de la construcción y demolición. La utilización de un 20% de hormigón con árido reciclado permitiría ahorrar la extracción de 7,7 millones de toneladas/año de piedras de cantera, lo que tendría un efecto directo en la reducción de las toneladas de escombros que se acumulan en los vertederos y los costes sociales que ello comporta.

Bibliografía

AGUIRRE, P. y COBOS, L. Recuperación de metales de residuos en corriente de metal fundido, *Ingeniería Química*, Abril 2006.

ALLAN, R. J. *Impact of mining activities on the terrestial and aquatic environment with enphasis on mitigation and remedial resources in heavy metals: problems and solutions*. Eds. Springer, Berlín, 1995.

ALONSO, J. L. *Estudio fisicoquímico y técnico de diversos tipos de cenizas volantes y su empleo como material de construcción*. Labor. MOPU. Madrid, 1966.

ARNOULD, M. y BARRÈS, M. *Géologie et confinement des déchets toxiques*. Vol. I. A. A. Balkema, 1993.

BOLSA DE SUBPRODUCTOS DE CATALUÑA. La problemática de los residuos en la industria de la construcción. *Jornadas de la Borsa de Subproductes de Catalunya. Construmat'93*. Fira de Barcelona.

BOZADIJEZ, L., DIMOVA, T., GEORGIEVA, K., Blast-furnace slag as a raw material for tires, Bulgaria, *Tile and Brik Int*. Vol. 7 n.º 5, 1991.

BRINDLEY, G. W. y MACEWAN. Structural aspects of mineralogy of clays and related silicates. *Symposium on Ceramics*: British Ceramic Society, 1953, pp. 15-59.

CASAGRANDE, A. Clasification and identification of soils. *Trans. ASCE*, 1948, Vol. 113.

CASAL, J. *et al. Análisi del risc en instal·lacions industrials*. Edicions UPC. Barcelona, 1996.

COLLINS, R. J. *et al.* Technology for use of incinerator residue as haghway material. FHWA/RD, 1977.

DOMÈNECH, X., Química Verde. *Cuadernos de Medioambiente*, Ed. RUBES, España, 2005.

ELIAS, X. *Curso de Postgrado. Reciclaje de residuos en la construcción*. Cátedra de Materiales. Escuela Superior de Ingenieros de Caminos de Barcelona (UPC).

ELIAS, X. *La fabricación de materiales cerámicos*. (En imprenta).

GÓMEZ, E. *et al.* Biodegradación de asfaltenos del Prestige mediante aplicación de técnicas de compostale-vermicompostaje. *Reista Residuos*, núm. 92 (2006).

HAYNES, J. y LEDBETTER, W. B. *Incinerator residues in bituminous base construction*. FHWA/RD, 1976.

IHOBE S. A. Sociedad Pública de Gestión Ambiental Gobierno Vasco, *Libro blanco para la minimización de residuos y emisiones* – Escorias de Acerías, 1999.

JARRIGE, A. *Les cendres volantes. Proprietés. Application industrielles*. Eyrolles. París, 1971.

JERROLT, J. *Mining environmental handbook: effects of mining on the environmental and American environmental controls on mining*. Imperial College Press, 1997.

KOSSON, D. S. *et al.* A comparation of solidification / stabilization process for treatmnet of municipal waste combustion residues. Part II. En: *International Conference of MSW*. Tampa. Florida, US, 1991.

LABRINCHA, J. A., RIBEIRO, M. J., Reutilización de granalla de desbaste de la industria naval en la fabricación de cemento Portland, *Revista Residuos*, n.º 74.

LAYNER, YU. A. *Production of alumina. Metallurgy of non-ferrous and rare metals*. VINITI AS URSS, Moscow, 1979.

LE CHARBON. *Problemes d'environnement et solutions*. Ed. Publications de l'Ocde.

MARAÑÓN, E., CASTRILLÓN, L. Y FERNÁNDEZ NAVA, Y., Evaluación del impacto medioambiental de las explotaciones ganaderas: un caso de estudio en el norte de España. *Residuos Ganaderos*, 2006.

NEE, L. P. *State of the art and perspectives of processing of low-quality aluminium raw materials of Kasakhstan*. Vestnik AS Kaz. SSR, 1983.

PORTA, J. Problemes de la degradaciò dels sòls als Països Catalans. *Revista de Catalunya*, 1990, núm. 43.

POUSADA, E. *Deformabilidad de las arcillas expansivas bajo succión controlada*. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (Laboratorio de Carreteras y Geotécnia). Madrid.

RABAH, M.A., Ligthweight bricks from metallurgical wastes, *Tile and Brick Int*. Vol. 7. N.º 2, 1991.

ROSS, S. M. *Toxic metals in soil-plant systems*. John Wiley & Sons, 1994.

STOELHORTS, D. *AVI slag can replace gravel in concrete production. The use of waste materials in civil engineering*. Elsevier Science Publishers. Amsterdam, 1991.

SYNDER, R. R. *Evaluation of fused incinerator residue as a paving material*. FHWA/RD, 1980.

TOGNON, G. Combined lime and specific surface area of thr hydration products of lime-puzzolana and lime-fly ashes mixes. *Proc. Sympos. Mater. Res. Soc*. 145-154.

US Department of the interior. Bureau of Reclamation. *Manual de tierras*. Editorial Técnica Bellisco. Madrid.

WILES, C. C. The US EPA, municipal waste combustion residue solidification / stabilization program. *Proceedings of 17 Annual Conference of Hazardous Waste Research Symposium*. Cincinnati, OH, 1991.

Los residuos mineros

9

Xavier Elias, Juan B. Menéndez, Jorge Molina

ÍNDICE

1. Introducción 639
1.1. Introducción a la Ley de Minas 639
2. Las rocas industriales para la construcción 640
2.1. Principales rocas empleadas en la construcción 641
2.2. Sostenibilidad y herramientas de evaluación del impacto ambiental de materiales y productos para la construcción..... 645
3. Estériles en las labores de explotación..... 647
3.1. Residuos generados 648
3.2. Otras afecciones ambientales en la minería. 652
3.3. Cómo evitar o eliminar estos efectos ambientales 654
3.4. Estructura de la restauración para una actividad extractiva..... 657
3.5. Impactos producidos por la extracción de áridos en graveras 661
3.6. Reciclaje y valorización de residuos mineros.. 662
4. Impacto ambiental de la minería metálica..... 664
4.1. Introducción a la problemática minera metálica..... 666
4.2. Impacto ambiental por explotaciones mineras 667
4.3. Tipo de procesos extractivos, Beneficio de minerales..... 674
4.4. Principales residuos mineros por proceso ... 679
4.5. Identificación de principales residuos peligrosos, posibilidades de reemplazo, minimización y/o valorización..... 683
4.6. Chatarras: ¿nuevos recursos?..... 683
5. Valorización de escorias 686
5.1. Valorización energética por medio de la recuperación del calor sensible de escorias de fundición..... 686
6. Procesos de beneficio de minerales y sus principales residuos 689
6.1. Vía húmeda o hidrometalurgia 689
6.2. Vía seca o pirometalurgia..... 693
7. Legislación..... 695
Bibliografía..... 695

RESUMEN

Los residuos mineros, en sus tres grandes clases: residuos de la minería metálica, residuos de la minería energética y la de materiales de la construcción, constituyen, sin duda, la partida más importante en la generación de residuos. Los procedentes de las actividades mineras de las explotaciones energéticas y metálicas son, desde el punto de vista ambiental, las más conflictivas.

La primera parte de este capítulo se destina a la minería para la extracción de materiales para la construcción, mientras que la segunda se destina a la minería metálica (la minería energética se ha desarrollado en el Capítulo 8).

Cada uno de los apartados se enfoca teniendo en cuenta la vertiente ambiental, especialmente en lo concerniente a la valorización.

1. Introducción

Las actividades mineras son de vital importancia para el desarrollo de la sociedad desde tiempos ya prehistóricos. No es de esperar que en el futuro esta actividad disminuya, sino más bien todo lo contrario, por lo que es conveniente tomar las medidas que ayuden a un desarrollo sostenible y, sobre todo, que minimicen el impacto ambiental.

Desde la óptica ambiental las actividades mineras deben clasificarse en tres grandes subgrupos, por otra parte perfectamente delimitados:

- La minería energética. Que hace referencia a la extracción de combustibles fósiles.
- La minería metálica. Desde la extracción del mineral hasta la obtención de los metales.
- La minería para materiales de construcción. Es decir toda aquella actividad de extracción no-metálica y no-energética.

Las labores mineras, con sus impactos y residuos de toda clase son las originadas en la mina, en el más amplio sentido de la palabra, y en las actividades directamente relacionadas con ella. Así, en la minería del cobre se puede citar la extracción propiamente dicha y los residuos procedentes de la concentración. A título de introducción basta con citar el caso del cobre: por cada kilo de cobre se generan, por término medio, 500 kg de residuos de diversa peligrosidad.

Uno de los grandes problemas de la minería metálica es, precisamente, la concentración. Las leyes de los minerales son muy bajas y por tanto la cantidad de material inservible, residuos, supera en muchos órdenes de magnitud el propio metal obtenido. Se trata de un caso muy alejado de la minería para materiales de construcción pero más próximo a la minería energética, en particular a la del petróleo.

Por lo general, los residuos mineros se generan, una parte en la propia zona de extracción (generalmente denominados estériles) y otra parte en cantidad menos importante pero ambientalmente más conflictiva en la etapa de concentración.

En algunas actividades mineras, por ejemplo la del aluminio, al ser tan demandante de energía la extracción de la bauxita se realiza, obviamente, en la mina, después existe un transporte, generalmente por barco y finalmente se procede a la concentración en el lugar donde la energía eléctrica es abundante y barata (normalmente hidroeléctrica). En este caso se suscita una discusión. Los residuos del procesamiento de la bauxita deben ser considerados residuos industriales, puesto que se generan en una industria que no es minera, o bien han de catalogarse como residuos mineros. Desgraciadamente, las autoridades de algunos países pierden el tiempo en discusiones bizantinas sobre la denominación de los residuos generados en lugar de aplicarse a mitigar el efecto ambiental.

El espíritu de esta obra se halla claramente enfocada a la valorización de los residuos de las actividades, con independencia que sean municipales, industriales o mineras. Por ello la parte de la minería del carbón se ha incluido en el Capítulo 8 de esta obra y está tratada desde la óptica de valorización de los residuos.

En el presente capítulo se hace una referencia a los impactos de las actividades de la minería metálica y de la de materiales para la construcción.

1.1. INTRODUCCIÓN A LA LEY DE MINAS

El Ministerio de Industria español ha elaborado un Plan Nacional de Minería, en el que se destina un capítulo al Programa Nacional de Investigación Minera y los tres restantes al Programa Nacional de Explotación Minera, a la Actualización de la Legislación Minera y a la Política Social en la Minería, procediéndose de forma simultánea y coordinada por los distintos grupos y comisiones de trabajo a la realización de los estudios correspondientes a cada uno de los capítulos citados. Con ello se ha culminado la Ley 22/1973, de 21 de julio, de Minas (BOE núm. 189, de 24-07-1973).

En el Título I de la presente Ley se reafirma la naturaleza jurídica de los yacimientos minerales de origen natural y demás recursos geológicos como bienes de dominio público y se mantiene la concesión administrativa como institución tradicional al principio básico de nuestro ordenamiento minero.

El Titulo II, al ocuparse de la acción estatal encomienda al Estado la educación periódica del Programa Nacional de Investigación Minera y el de Revalorización de la Minería, previendo la colaboración de los particulares con la Administración en la obtención de muestras y datos de origen geológico.

La Ley consta de 120 artículos, si bien a título de introducción basta con citar el artículo tercero.

Artículo 3

1. Los yacimientos minerales y demás recursos geológicos se clasifican, a los efectos de esta Ley, en las siguientes secciones:

A) Pertenecen a la misma los de escaso valor económico y comercialización geográficamente restringida, así como aquellos cuyo aprovechamiento único sea el de obtener fragmentos de tamaño y forma apropiados para su utilización directa en obras de infraestructura, construcción y otros usos que no exigen más operaciones que las de arranque, quebrantado y calibrado.

B) Incluye, con arreglo a las definiciones que establece el capítulo primero del Título IV, las aguas minerales, las termales, las estructuras subterráneas y los yacimientos formados como consecuencia de operaciones reguladas por esta Ley.

C) Comprende esta sección cuantos yacimientos minerales y recursos geológicos no estén incluidos en las anteriores y sean objeto de aprovechamiento conforme a esta Ley.

2. Queda fuera del ámbito de la presente Ley la extracción ocasional y de escasa importancia de recursos minerales, cualquiera que sea su clasificación siempre que se lleve a cabo por el propietario de un terreno para su uso exclusivo y no exija la aplicación de técnica minera alguna.

3. Los criterios de valoración precisos para configurar la sección A) serán fijados mediante Decreto acordado en Consejo de Ministros a propuesta del de Industria, previo informe del Ministerio de Planificación del Desarrollo y de la Organización Sindical.

2. Las rocas industriales para la construcción

La actividad minera dedicada a la extracción de rocas industriales tipo arcillas, calizas, granitos, etc., tiene o genera unos residuos muy similares para un mismo tipo de explotación.

Generalmente, esta actividad se realiza en explotaciones al aire libre, que se denominan a cielo abierto, sin embargo y por motivos ambientales ya existen, en ciertos territorios con elevado valor ecológico, explotaciones subterráneas donde la mayor parte de la actividad minera se desarrolla en el interior, como en la mina «SALA» que muestra la Figura 9.1.

Tanto en unas como en otras es necesario arrancar la roca o material mediante diferentes técnicas, dependiendo del tipo y dureza de las mismas. Puede ser mediante la utilización del explosivo o por medio de máquinas adecuadas. El producto extraído en los frentes de explotación es enviado a la planta de tratamiento, generalmente situada en la proximidad de los frentes o a escasa distancia.

El tratamiento de la roca consiste en dos o tres fases de trituración y clasificación donde, mediante reducciones progresivas de la misma, se prepara o fabrica el producto vendible. Casi siempre son diferentes fracciones granulométricas que se obtienen con destino a diferentes mercados.

Su destino final dependerá del grado de fragmentación obtenido y de su calidad. El porcentaje mayor tiene como aplicación principal la fabricación de cemento, de hormigones y de aglomerado asfáltico. También se utilizan en la fabricación de cales, en la

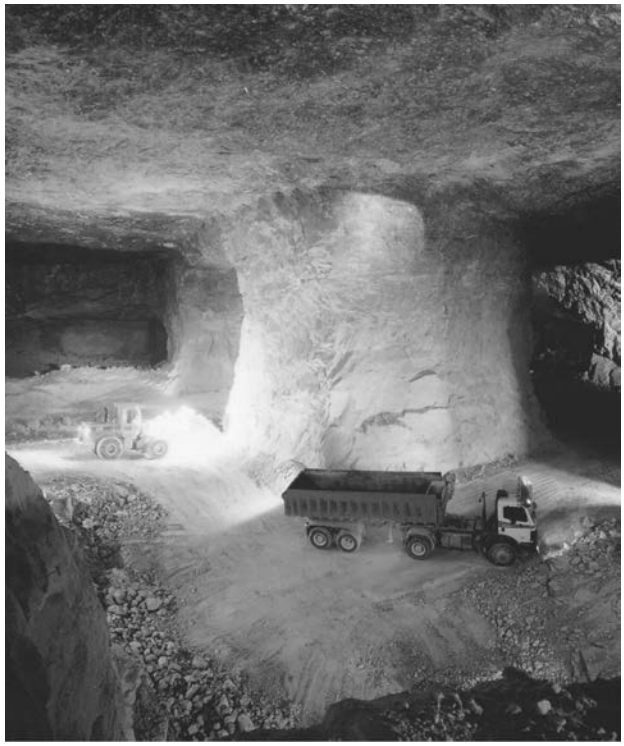


Figura 9.1. Explotación de una mina subterránea de caliza (gentileza de Explotaciones Calcita, S.A.).

Figura 9.2. Materiales elaborados con bloque de caliza (gentileza de Torho).

depuración de agua y en porcentaje más pequeño en obtención de bloques, caso de las rocas ornamentales, campo donde el diseño está presente, como muestran los ejemplos de la Figura 9.2, y en aplicaciones en farmacia para los materiales de mayor pureza. En fin, son materiales que tienen una multitud de aplicaciones, de importancia extraordinaria en el desarrollo de nuestra sociedad.

2.1. PRINCIPALES ROCAS EMPLEADAS EN LA CONSTRUCCIÓN

España, desde finales de la década de 1990 se ha convertido en el país de la UE con mayor tasa de edificación. Hay estadísticas que aseguran que el levante español (fachada mediterránea) acapara casi el 40% del total de la edificación de la UE, cuando su peso relativo, tanto en población como en potencial económico, es del 8%. La Figura 9.3, aunque referida a la producción de ladrillos y tejas en 2004, pone de relieve tal aseveración. En el apartado 1.1 del Capítulo 8 existen diversas estadísticas sobre la generación de materiales de construcción.

La patronal Hispalyt agrupa a más de 300 empresas en toda España que emplean a más de 12.000 personas y genera un volumen de negocio de 1.260 millones de euros, un 5% más que en 2004.

2.1.1. Áridos para la construcción

La Tabla 9.1 pone de manifiesto la importancia de la extracción de áridos para la construcción y cómo se distribuye.

Tabla 9.1. Materiales

CONSUMO DE ÁRIDOS PARA LA CONSTRUCCIÓN POR COMUNIDADES AUTÓNOMAS (millones de toneladas)				
	2004	2005	Variación 05/04 (%)	Consumo (t/habitante)
Andalucía	88,0	90,8	3,2	11,6
Aragón	12,9	14,7	13,9	11,6
Asturias	9,9	10,1	2,0	9,4
Baleares	8,6	9,7	12,7	9,9
Canarias	18,5	18,7	1,2	9,5
Cantabria	7,0	7,0	0,1	12,4
Castilla y León	31,1	32,4	4,1	12,9
Castilla-La Mancha	23,1	27,4	18,6	14,5
Cataluña	56,6	60,4	6,7	8,6
C. Valenciana	59,5	59,8	0,5	12,7
Extremadura	10,1	11,6	14,3	10,7
Galicia	24,5	23,3	-4,6	8,5
Madrid	41,0	47,8	16,5	8,0
Murcia	18,5	18,6	0,5	13,9
Navarra	8,5	8,3	−2,6	14,0
País Vasco	15,9	16,2	2,1	7,6
La Rioja	3,6	3,4	−5,3	11,2
Total estatal	437,5	460,3	5,2	10,4

La tabla anterior indica que la extracción de áridos correspondiente a la zona mediterránea (Cataluña, Valencia, Murcia y Andalucía) acapara la mayor parte.

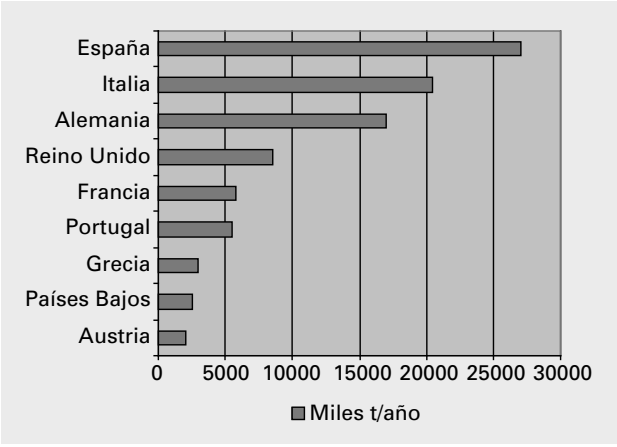


Figura 9.3. Producción de tejas y ladrillos en la UE en 2004. Cifras en miles t/año. (Fuente Hispalyt).

2.1.2. Impactos producidos por la extracción de áridos en graveras

Las extracciones de áridos naturales, asociados a la dinámica fluvial, y situadas en las terrazas de los ríos produce una serie de impactos que se analizan a continuación. Los criterios de valoración y estudio de impacto serían también válidos para las graveras de montaña o «pie de monte», constituidas fundamentalmente por acumulaciones detríticas procedentes de la erosión de los relieves vecinos, asimilándolas a los efectos que producen las extracciones en terrazas antiguas, sin contacto con lámina de agua.

Como en el resto de las explotaciones, lo primero que se hace es preparar el terreno a excavar, limpiándolo y eliminando la masa arbórea, arbustiva y herbácea; seguidamente se elimina la capa vegetal de suelo existente. Los efectos generados en esta fase son ruido, polvo, impacto visual y posible erosión del terreno desnudo.

Una vez preparado el terreno se realiza la extracción del árido mediante palas excavadoras o dragas, caso de extracciones bajo nivel freático, y camiones que lo transportan hasta la planta de tratamiento, donde se trituran y clasifican las diferentes fracciones granulométricas.

En determinados lugares, las administraciones prohíben realizar la extracción del árido por debajo del nivel freático e incluso requieren que la cota del nivel inferior de extracción se quede por encima de su cota máxima y a una determinada distancia, variable según el lugar.

A los efectos ambientales típicos de estas fases de la actividad, extracción, transporte y tratamiento, como son ruido, polvo e impacto visual de los frentes, se han de añadir los correspondientes a la posible afección del nivel freático, procesos de inundación y erosión de la gravera, contaminación del agua por vertido directo y por la maquinaria utilizada.

Las graveras ocupan por lo general grandes extensiones de terreno por lo que en caso de extracción por debajo del nivel freático y consiguiente inundación de la misma, la elevada superficie expuesta puede dar lugar, en ciertas épocas del año, a una gran evaporación del agua contenida. Este fenómeno se vería agravado en caso que además exista viento. La evaporación se puede dar aún en el caso que la extracción de gravas no llegue al nivel freático, pero quede próximo, al producirse el ascenso del agua por capilaridad.

Uno de los tratamientos que se suele dar al material extraído es su lavado para eliminar las tierras que se adhieren al mismo y obtener un árido de mayor calidad. El lavado del árido origina un agua contaminada con barro que cuando es vertida al cauce directamente, y según sea la concentración de la fracción sólida en el agua, puede afectar a la flora y fauna del río, dependiendo de su estructura y caudal.

Las recomendaciones y procedimientos para evitar los impactos son los siguientes:

- Si la extracción se realiza por debajo del nivel freático realizar la extracción del árido sin deprimir el nivel de agua, mediante dragalina o similar.
- Para evitar al máximo la evaporación del agua de la gravera es necesario que la extensión de la lámina de agua superficial sea mínima. Una vez definida la superficie mínima necesaria, el concepto de restauración integrada vuelve a adquirir importancia: ese hueco operativo mínimo sería muy interesante, que con la misma velocidad que avanza la extracción, se fuese recuperando el terreno, manteniendo un área de afección constante.
- Realizar un efectivo cierre del perímetro de la gravera para evitar, en el hueco creado, el riesgo de vertidos de cualquier clase de materiales y el subsiguiente problema de contaminación.
- Si se realiza relleno para recuperar el hueco creado: el material de relleno tiene que ser totalmente estéril y, a poder ser, de una permeabilidad parecida a la de las gravas extraídas, para que hidráulicamente siga funcionando

igual que antes de la explotación. Por tanto, se tendrá que realizar con materiales que, además de ser totalmente estériles, no contengan fracciones importantes de finos que puedan colmatar el acuífero en algún punto. Se requiere un exhaustivo control del relleno mediante una estrecha vigilancia.

- Para evitar que el lodo contenido en el agua de lavado del árido afecte la flora y fauna del cauce donde se vierte es necesario eliminar, previamente, la fracción sólida. Para conseguirlo se hace pasar el efluente por dos o más balsas de decantación, donde se deposita la fracción sólida antes del vertido del agua al cauce público.
- No afectar puntos de recarga y controlar el efecto barrera que den lugar a modificaciones el nivel freático. Esto puede afectar negativamente al acuífero general y a las extracciones de agua que existan.
- Prever que la maquinaria de la explotación realice los mantenimientos en lugares adecuados e impermeables, evitando los derrames accidentales de aceites, para que no se contamine el acuífero.
- Si el acuífero es importante y de él se aprovisionan abastecimientos de cierta envergadura, lo más adecuado sería realizar un estudio hidrogeológico donde se determinen todos los parámetros hidráulicos para el conocimiento exacto de su funcionamiento, puntos de extracción, población afectada, calidad del agua, etc. De esta manera se podría valorar la importancia y los riesgos existentes para adoptar las soluciones que correspondan.
- Conservar el suelo edáfico. Evitar que el suelo edáfico existente se pierda en las primeras etapas de preparación del terreno y almacenarlo convenientemente, procurando proteger su flora y fauna y que no pierda sus características fisicoquímicas. Recuperados morfológicamente los terrenos, colocar rápidamente la capa de suelo que ha sido almacenada.
- Mantener la vegetación. Tan pronto se haya recuperado la morfología final y colocado el suelo edáfico, se realizará, lo más rápidamente posible, la plantación de los árboles, especies arbustivas y herbáceas propias de la zona para evitar cualquier tipo de erosión.
- Controlar el impacto visual. No mantener afectadas grandes superficies. En ocasiones, con objeto de aprovechar la maquinaria de limpieza, se preparan superficies demasiado grandes. Sería recomendable destapar la montera necesaria para un tiempo de explotación comprendido entre 6 y 12 meses y si existe alguna zona arbolada de manera que pueda servir de pantalla visual, tratar de mantenerla activa hasta el ũltimo momento»; un estudio de visuales ayuda a acercarse a la solución ideal.
- Protección del terreno. En las explotaciones cercanas al cauce, dejar un macizo de protección suficientemente ancho, para poder hacer frente a las crecidas y grandes avenidas que se puedan producir; se tiene que evitar que esos caudales importantes de agua entren directamente en el hueco excavado y lo erosionen, provocando daños en la propia finca y en las colindantes.
- Ruido y polvo. Para evitar estos efectos es necesario situar la maquinaria de tratamiento en lugares alejados de zonas habitadas, interponer entre el origen del efecto y el objeto barreras físicas, cubrir y apantallar las instalaciones, riegos de zonas de maniobras y paso. Controlar y limitar la velocidad de los vehículos.
- Efecto socioeconómico. Para evitar afecciones a fincas vecinas y caminos hay que dejar un macizo de protección adecuado y un talud de acuerdo con el ángulo estable de cada material. Vallar y señalizar el hueco para evitar caídas de vehículos y personas, especialmente en horas nocturnas.
- Controlar que todos los vehículos de transporte dispongan de caja con cubierta para protección de la carga e impedir su pérdida desde la misma evitando posibles accidentes y efectos de suciedad sobre las carreteras.
- Limitar la velocidad de los camiones, que evacuan los productos finales, en las zonas de paso próximas a lugares habitados.

2.1.3. Arcillas

Las arcillas son uno de los materiales de construcción más empleados. Sin embargo no suelen usarse directamente tal y como se extraen de la cantera, si no después de su transformación. Probablemente ningún material extraído de la corteza terrestre tiene tantas aplicaciones como la arcilla. A continuación se listan sus aplicaciones más usuales:

Cerámica: Para usarla en cerámica sus propiedades básicas han de ser la plasticidad y el endurecimiento que sobreviene cuando se realiza la cocción. De hecho, lo que vulgarmente se denomina arcilla es un conjunto heterogéneo de minerales de arcilla propiamente dichos y un variopinto grupo de otros minerales, entre los que destaca el cuarzo.

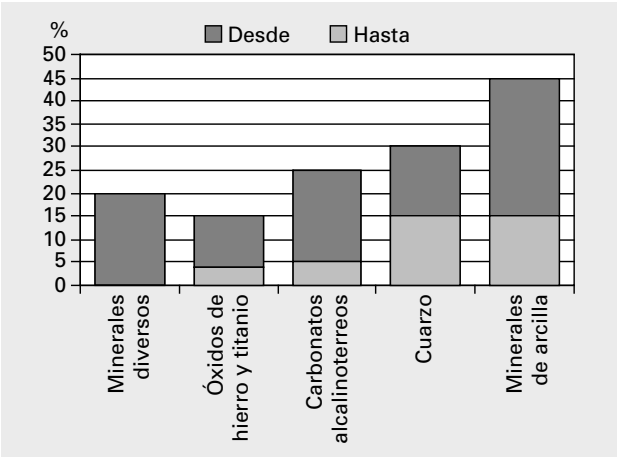


Figura 9.4. Distribución de minerales en arcillas rojas de interés cerámico.

El histograma de la Figura 9.4 simboliza una media de la distribución de diferentes minerales que se presentan en las arcillas de interés cerámico. Las cantidades son porcentuales e indican el intervalo habitual de cada mineral (en el caso del cuarzo, del 15 al 30%, por ejemplo). En la Figura 9.4 se observa que los minerales de arcilla, en las arcillas de interés cerámico, raramente sobrepasan el 50%.

La mayoría de aplicaciones de la arcilla se encuentran en el campo de las cerámicas. La arcilla se moldea fácilmente y luego se hornea para volverse resistente térmica y mecánicamente.

Para la fabricación de fibras para aislamientos, se utiliza caolín con pequeñas cantidades de óxidos de álcalis, circonio y boro. Esta mezcla se funde en un horno eléctrico y el líquido resultante de la fusión se sopla y carda, llegándose a producir un material esponjoso, blanco y ligero parecido al algodón (fibra cerámica).

Para la fabricación de refractarios sílico-aluminosos y aluminosos se utilizan las arcillas caoliníticas de media («*fire clay*») o alta refractariedad como materia prima. Estas arcillas, plásticas o no, deben poseer refractariedades no inferiores a 1.500 ℃. Todas las arcillas caoliníticas usadas en la industria de refractarios deben tener un contenido en hierro y álcalis lo más bajo posible. Juntamente con el caolín, estas arcillas se utilizan para la fabricación de chamota por calcinación a temperaturas elevadas, chamotas que añadidas a diferentes mezclas arcillosas se utilizan en la industria de los refractarios.

Otra aplicación cerámica de la arcilla puede situarse en el campo de la construcción civil. Para cerámica estructural se utiliza arcilla roja común. De entre los productos más usuales, puede citarse el ladrillo común o la teja. Otras especies de arcillas, como las pizarras, se usan en desmontes de grandes obras públicas cuando este recurso está cerca.

Papel: El papel está formado por una red de fibras de celulosa entrelazadas. Las irregularidades superficiales se corrigen añadiendo cargas, que además sirven para modificar el gramaje. Éstas están constituidas por caolín, talco, carbonato cálcico y resinas aglomerantes.

Cemento: Para la fabricación del clínquer, se utiliza piedra caliza y arcilla. El conjunto se calcina sobre los 1.400 ℃, se pulveriza y se le añade un poco de yeso y, con frecuencia, cenizas volantes (residuo procedente de las centrales termoeléctricas); esta mezcla recibe el nombre de cemento. Para la fabricación de los cementos blancos (aluminosos) se usan caolines.

La Tabla 9.2 reproduce la composición química media de un típico cemento Portland en comparación con un aluminoso (Electroland). De hecho, a este último cemento no debería llamársele así puesto que no tiene aditivos, es clínquer 100%. Otro tipo de cemento refractario es el «Secar» compuesto, casi exclusivamente, por Al_2O_3 (70%) y CaO (30%) y exento de óxidos de hierro.

Tabla 9.2. Composición química de cementos

Óxido, en %	Cemento Portland	Cemento aluminoso
SiO_2	19-25	2-3,5
Al_2O_3	5-9	40-42
Fe_2O_3	2-4	8-12
FeO	—	2,5-5,5
CaO	60-64	38-40
MgO	1-4	—
TiO_2	—	1,5-2
SO_3	1-2	—

Agregados ligeros: También llamados áridos expandidos. Son cada día más utilizados en la construcción civil y se caracterizan por tener una estruc-

tura celular que proporciona baja densidad y capacidad de aislamiento térmico. La baja densidad se consigue a base de incorporar a la arcilla un producto orgánico que a alta temperatura formará gases y, por tanto generará porosidad o bien utilizar arcillas ricas en hematites.

Caucho: Las arcillas caoliníticas y los caolines se utilizan como cargas para reforzar el caucho. Las características físicas y químicas de las cargas inorgánicas que les confiere el poder reforzante no están del todo claras, pero uno de los parámetros más influyentes es la superficie específica de la carga. Los caolines se dividen en duros y blandos; los primeros confieren al caucho vulcanizado mayor resistencia a la abrasión que los segundos, los caolines duros; como especificación granulométrica, deben poseer 80% de las partículas con diámetro menor a las 2 micras, en cuanto que los blandos, sólo el 56%.

Agricultura: El poder adsorbente de la arcilla desempeña un papel importante en la agricultura, ya que algunos minerales de arcilla adsorben rápidamente iones minerales libres que pueden ser fácilmente cambiados por otros iones de mayor valor para las plantas.

Otras aplicaciones: Se usan arcillas como ligantes de arenas para los moldes de fundiciones en la industria metalúrgica, en cargas para ciertos plásticos y en la fabricación de tintas, ya que ciertas arcillas presentan un gran poder de suspensión e impiden que los pigmentos sedimenten. También en aplicaciones de filtraje (aceites, vinos, cerveza,...) y clarificación de agua, y como medio impermeabilizante para canales, embalses, muros, cubetas de vertederos de basuras, etc.

La Tabla 9.3, muestra, citando fuentes de IGME Recursos Minerales, la producción de arcillas de interés cerámico, por Comunidades Autónomas, en 2001.

La Tabla 9.4, procedente de la misma fuente que la anterior, muestra la importancia relativa del empleo más común de las arcillas.

Tabla 9.3. Extracción de arcillas de interés cerámico en España, 2001

	t/día cocidas	t/año cocidas	t/año sin cocer
Andalucía	14.803	4.884.990	6.106.239
Castilla-La Mancha	17.620	5.814.600	7.270.251
Cataluña	11.183	3.690.390	4.612.989
C.Valenciana	11.188	3.692.139	4.615.174
Castilla y León	7.533	2.485.725	3.107.157
Galicia	4.552	1.502.160	1.877.700
Aragón	3.407	1.124.310	1.405.388
Madrid	1.585	522.984	653.730
La Rioja	2.635	869.550	1.086.938
Extremadura	1.060	349.800	437.250
Asturias	1.320	435.600	544.500
Murcia	440	145.200	181.500
Navarra	880	290.400	363.000
Baleares	1.062	350.460	438.075
Cantabria	580	191.400	239.250
País Vasco	320	105.600	132.000
Total	80.168	26.455.308	33.069.135

Tabla 9.4. Destino de las arcillas como material de construcción. España, 2001

Uso	Nacional t/año
Pasta roja (ladrillería y tejas)	33.069.135
Pasta roja (pavimentos y revestimientos)	9.780.000
Arcillas rojas (cementos)	2.664.000
Total	45.513.135

2.2. SOSTENIBILIDAD Y HERRAMIENTAS DE EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE MATERIALES Y PRODUCTOS PARA LA CONSTRUCCIÓN

Cuando alguien plantea la reducción del impacto ambiental de un edificio, es preciso abordar esta cuestión a distintos niveles: en la elección de materiales, en la selección de soluciones constructivas o, lo que es mejor, de una manera integrada considerando estos aspectos en el conjunto del edificio y en todo su ciclo de vida (desde que se construye hasta que se derriba, teniendo en cuenta su rehabilitación, uso y mantenimiento).

No se trata tan sólo de seleccionar un material de bajo impacto, sino de tener en cuenta para qué se requiere: cuál va ser su uso, qué durabilidad y prestaciones debe garantizar… ya que estas cuestiones determinarán su impacto en todo el ciclo de vida del edificio. La selección de materiales no se centra tan sólo en la fase de diseño del mismo, sino también es necesaria, en mayor o menor grado, en las distintas etapas de su ciclo de vida, como se esquematiza en la Figura 9.5.

Después de esta primera reflexión, será necesario analizar las distintas opciones disponibles en el mercado técnica y económicamente viables. En este sen-

Figura 9.5. Fases del ciclo de vida de un edificio.

tido existen distintas bases de datos y herramientas que, aunque no están muy desarrolladas para el sector de la construcción, ayudan a tomar decisiones en la selección de materiales que compondrán el edificio.

Cuando se trata de seleccionar un material o producto de la construcción, es aconsejable usar la siguiente información:

- *Intensidad energética.* Cantidad de energía necesaria para la fabricación de un kg de un material de construcción determinado. Es importante tener en cuenta cuando se utilizan estos datos, la durabilidad y el uso que se va a dar a este material, ya que hay materiales con elevada intensidad energética a los que su durabilidad les hace ambientalmente más interesantes para un empleo determinado. La intensidad energética de un material proporciona información parcial del perfil ambiental del producto, ya que informa sobre su impacto energético pero no sobre otros vectores ambientales como el agua, emisiones a la atmósfera, etc.
  Una base de datos sobre intensidad energética de materiales de la construcción es la elaborada por el ITEC (2005), donde constan los MJ/kg de 167 materiales básicos de construcción. (Más información en: http://www.itec.es/bedec/default.asp?Idioma=cat).
- *Ecoetiquetas* (norma ISO 14024:1999). Certificados oficiales para un grupo de productos o materiales que garantizan el cumplimiento de unos requisitos definidos por el organismo que los otorga, como es el caso del distintivo de calidad ambiental desarrollado por la Generalitat de Cataluña. El cumplimiento de estos requisitos supone unas aptitudes ambientales a estos materiales o productos respecto al resto dentro de una misma categoría. (Más información en: http://mediambient.gencat.net/cat/empreses/ecoproductes_i_ecoserveis/eco.jsp).
- *Declaraciones ambientales* (norma ISO 14021:1999). Autodeclaraciones ambientales de los fabricantes sobre un producto (material reciclado, material biodegradable, material reciclable, etc.). Las autodeclaraciones no están avaladas por ningún organismo oficial, por ello no se encuentran muy desarrolladas en el sector de los materiales de la construcción; sí en los otros ámbitos, como el de material de oficina, productos de limpieza, etc.
- *Declaración sobre el perfil ambiental de un producto* o EPDs (norma ISO 14025:2000). Es una metodología preestablecida y propia de cada país y para cada producto (o grupo de producto), basada en el análisis del ciclo de vida y que trata de facilitar información ambiental del producto. Esta herramienta aún no se encuentra desarrollada en España, en cambio existen requisitos para realizar EPDs de diferentes categorías de productos en países como Alemania, Japón, Italia, República Checa... (Más información en http://www.environdec.com/page.asp?id=105&menu=1,5,0).
- *Análisis del ciclo de vida de un producto (ACV)* (norma ISO 14040:1997). El análisis del ciclo de vida de un producto valora los impactos ambientales de éste desde la extracción de materias primas hasta que el producto se convierte en residuo, teniendo en cuenta las fases de fabricación, uso y mantenimiento. Esta herramienta es compleja y requiere bastante información sobre el producto a valorar (existen distintos programas que disponen de bases de datos en el ámbito europeo que facilitan estos datos sobre

materiales). Son muy útiles los estudios de ACV sobre distintas soluciones constructivas que componen un edificio (ver Capítulo 2 de esta misma obra). Las EPDs se basan en esta metodología, aunque normalmente facilitan información sobre el producto desde la extracción de materias primas necesarias para su fabricación hasta el final del proceso productivo.

Otras herramientas complementarias:

- *Sistemas de gestión ambiental* (ISO 14001: 1996 y Reglamento EMAS: CEE 1836/1993). Finalmente, una buena herramienta para garantizar la calidad ambiental de los servicios contratados en las distintas fases del ciclo de vida de un edifico (construcción, mantenimiento, etc.) es el hecho de trabajar con empresas con especial sensibilidad ambiental. Las empresas que han implantado un sistema de gestión ambiental disponen de una mayor información ambiental de sus procesos de fabricación y funcionamiento. Un sistema de gestión ambiental requiere una mejora continua en la gestión ambiental de la empresa (proveedores de materiales, productos y servicios, gestión ambiental en la obra, etc.).

Desde la perspectiva de los técnicos que intervienen en el proceso de construcción, es importante incorporar el parámetro ambiental en la selección de los materiales, productos y productores. Cuando no se dispone de ninguna de las herramientas comentadas anteriormente, se puede igualmente valorar, de una manera más cualitativa, el vector ambiental de las distintas opciones disponibles en el mercado haciendo algunas preguntas sobre los materiales o productos técnica y económicamente viables (siempre pensando en todo el ciclo de vida de este material o producto dentro del edificio). Algunos ejemplos podrían ser:

- ¿Contiene materiales reciclados? (Materiales procedentes de la valorización de residuos, por ejemplo cerámicas con contenido de materiales reciclados)
- ¿Es un producto con materiales procedentes de fuentes renovables, como la madera?
- ¿Es un material/producto reciclable? (Con la tecnología actual disponible).
- ¿Utiliza uniones en seco? (Facilita la substitución de componentes y hace posible la separación de los distintos componentes para su reciclaje).
- Si se emplea madera, ¿se dispone de certificado de procedencia de explotaciones forestales sostenibles?
- ¿Es un material de origen local?
- ¿La empresa fabricante dispone de Sistema de Gestión Ambiental?
- ¿Dispone de garantías para la reducción del consumo de recursos? (Por ejemplo, electrodomésticos con etiqueta energética de tipo A).

De esta manera, exigir información ambiental del producto a los proveedores es una vía de incentivar el mercado de los materiales de bajo impacto ambiental o la adopción de buenas prácticas por parte de las empresas fabricantes de productos de la construcción, como también de servicios. Así, cada vez será más fácil optar por materiales y productos más respetuosos con el entorno, ya que se dispondrá de mayor abanico de opciones, y éstos serán más competitivos respecto al resto de materiales y productos.

Aunque se avanza lentamente, es importante incorporar estas reflexiones en todas las decisiones a tomar, tanto técnicos como usuarios, que intervienen en las distintas fases del ciclo de vida de un edificio (también en la rehabilitación y el mantenimiento de los mismos). Solo este camino es el que conduce a la incorporación de criterios de sostenibilidad en la construcción y el uso de los edificios.

3. Estériles en las labores de explotación

Antes de valorar los estériles que se producen durante la fase de explotación, es necesario realizar algunos comentarios sobre la comercialización de los productos finales obtenidos.

Los productos finales tienen un precio de venta bajo en comparación con el de los minerales, exceptuando el bloque de roca ornamental presente en cantidades, respecto al resto de rocas comentadas, muy pequeñas. Debido al costo de arranque, transporte y tratamiento, el beneficio obtenido es bastante ajustado. Ello obliga a que las explotaciones de estos tipos de roca se tengan que desarrollar sobre

macizos rocosos muy superficiales, o dicho de otra manera, la roca que interesa debería tener un nulo o escaso recubrimiento; únicamente se puede aceptar como tal, el suelo edáfico y alguna capa de tierras o de estériles, pero con poco espesor, pues de lo contrario el costo que ocasiona el movimiento de una cierta cantidad de estériles podría ocasionar la no viabilidad económica de la explotación.

Todo ello equivale a decir que las cantidades de estériles que se producen en la explotación de estas rocas no es elevado, es más bien reducido, tiene que ser obligatoriamente bajo, pues de lo contrario no existirá explotación económica. De ello, también se deduce que el impacto ambiental va a ser necesariamente menor que el de otro tipo de actividad minera.

Pero aunque la cantidad de rocas o materiales estériles encontrados en esta fase de la explotación sean de poca importancia, sí que es necesario gestionar su eliminación. En el caso de la minería de materiales para la construcción esta gestión es muy fácil, ya que se devuelven al mismo hueco creado por la explotación minera. O bien, si se dispone de cierta tecnología se puede reciclar para otros usos. Por ejemplo, en las minas de mármol de Carrara (Italia) no es posible abandonar los lodos procedentes del corte y pulido de los bloques. Ahora se obliga a su secado, lo que es evidentemente caro, pero, en contrapartida presenta la ventaja de su valorización como materia prima para la fabricación de clínquer.

Este relleno con material estéril es aprovechado en las etapas de restauración para conseguir una morfología mas favorable y, así, recuperar los terrenos que han sido excavados; se utiliza para poder obtener las inclinaciones adecuadas de taludes finales a restaurar y como base del suelo edáfico sobre el que ha de realizarse la recuperación de la flora en los terrenos a restaurar, como indica la Figura 9.6.

Por tanto, en esta actividad los estériles tienen un doble efecto, uno positivo y otro negativo. El negativo porque puede conducir a una baja rentabilidad de la explotación, dependiendo de la cantidad encontrada; el positivo porque son utilizados en la restauración de los terrenos afectados, consiguiendo con ellos una morfología mejorada.

3.1. RESIDUOS GENERADOS

En el frente de arranque donde se extrae la roca las operaciones a realizar son las de perforación, caso de romper la roca mediante explosivos, y posterior voladura. Una vez volada la roca, ésta es cargada en camiones tipo dumpers, mediante máquinas cargadoras para su traslado a la planta de tratamiento.

Por tanto, durante el proceso extractivo y posterior tratamiento se generan los tipos de residuos especificados en la Figura 9.7.

Obsérvese que se generan «*inputs*» y »*outputs*» tanto en la etapa de extracción, como en la de transporte y de tratamiento. En los apartados siguientes se describen los principales impactos.

3.1.1. Residuos generados en el frente de arranque

Dentro de esta etapa es preciso diferenciar:

a) *Residuos debido a los explosivos*

Los explosivos que se utilizan en el arranque y rotura de la roca son transportados en cajas de cartón y en envases (sacos) de plástico, aunque también podrían llegar en cualquier otro recipiente homologado;

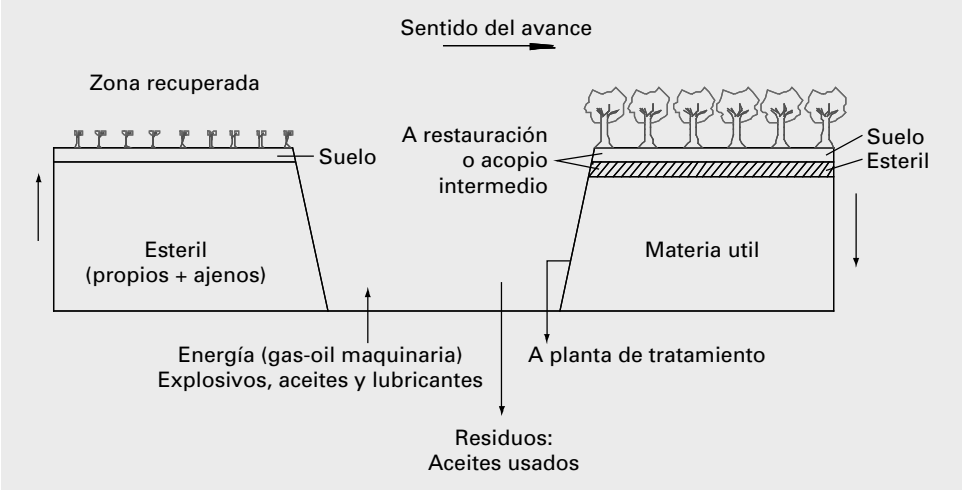


Figura 9.6. Esquema general de explotación de una mina.

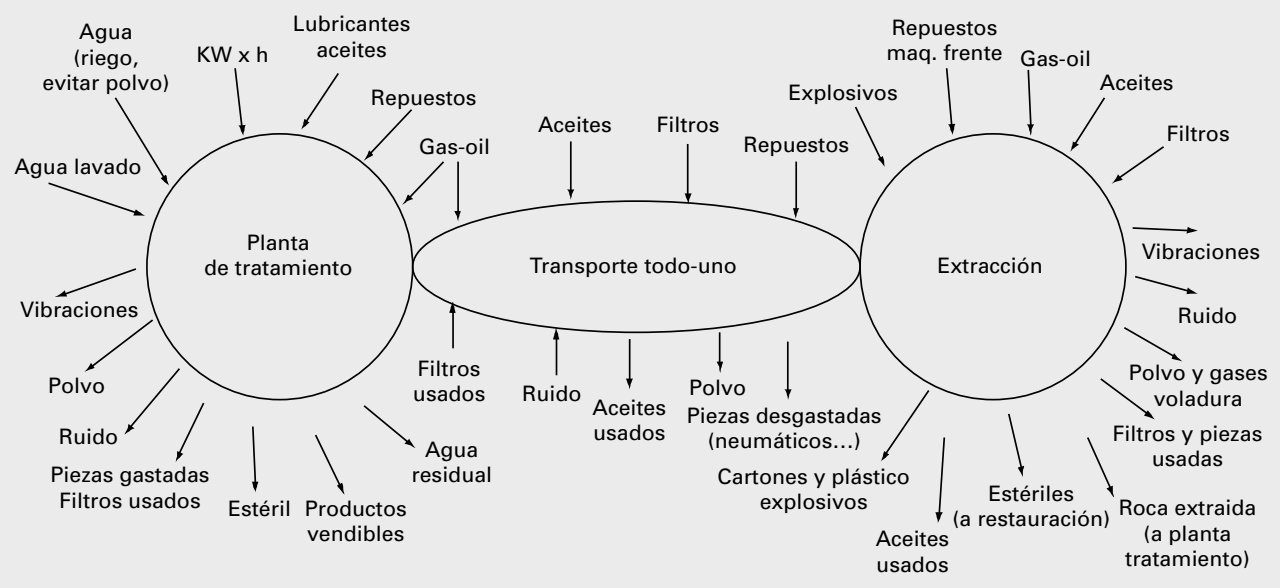


Figura 9.7. Flujo de materias, energía y residuos en la actividad minera.

por tanto, una vez usado el explosivo, los envases resultantes serán un residuo para la empresa. Debido a que son unos envases que han contenido explosivos su tratamiento no es el de un envase cualquiera. El mejor procedimiento para su eliminación es mediante incineración. En minería existe un procedimiento particular de incineración; se puede realizar la quema mediante un procedimiento adecuado y después comprobar detenidamente los envases para que no quede ningún resto de explosivo. El protocolo tiene que ser correcto y realizado con seguridad. (De hecho esta práctica tiene que ver con el gran consumo de este tipo de materiales peligrosos y la distancia de los centros de consumo, canteras, a las plantas de incineración de residuos especiales, en el caso de que existan en las cercanías. Ver ejemplo en Fig. 9.8).

b) *Residuos generados por la utilización de la maquinaria móvil*

En el frente las palas cargan los camiones, tipo dumpers, como el que muestra la Figura 9.9, con la roca extraída para su envío a la planta de tratamiento donde se la someterá a los procesos de reducción de tamaño y clasificación. Los residuos generados por esta maquinaria móvil, tanto la del mismo frente como la que se utiliza en el transporte, son aceites usados, filtros, baterías, piezas de acero desgastadas o rotas y neumáticos.

Debido a la magnitud de este transporte, los «dumpers» pueden cargar entre 30 y casi 400 t de material, los consumos y residuos también adquieren otra magnitud.

Figura 9.8. Envase contenedor de materias explosivas.

3.1.2. Residuos generados en la zona de instalaciones

En la zona de instalaciones donde se ubica la planta de tratamiento se puede considerar los siguientes impactos diferenciados por zonas.

Figura 9.9. «Dumper» usado para el transporte en el interior de las zonas de extracción.

a) *Residuos generados en la planta de tratamiento*

Donde normalmente existen diferentes trituradores (la Figura 9.10 muestra un esquema de una machacadora de mandíbulas, máquina muy usada en la llamada trituración primaria). Los molinos no generan residuos pero para lograr un tamaño de distribución de partícula adecuado hay que recurrir a la recirculación con el empleo de cribas primarias, secundarias y terciarias y un gran número de cintas transportadoras que se utilizan para mover la roca que tratan las anteriores máquinas, los residuos habituales son restos de cintas transportadoras de neopreno, poliuretano, etc., piezas de acero desgastadas procedentes de la maquinaria de trituración, rodillos de las cintas transportadoras, tamices desgastados o rotos de acero de la cribas vibratorias.

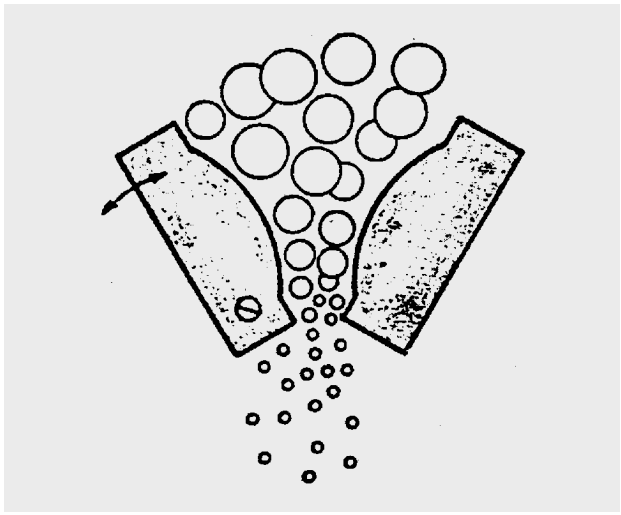


Figura 9.10. Machacadora de mandíbulas.

En la etapa inicial de la planta de tratamiento, los materiales se someten a cribado para eliminar la fracción fina (la Figura 9.11, muestra la foto de una criba vibratoria). La fracción fina del todo-uno procede de los frentes, que suele estar formada por fragmentos muy pequeños de roca, mezclados con arcillas y limos.

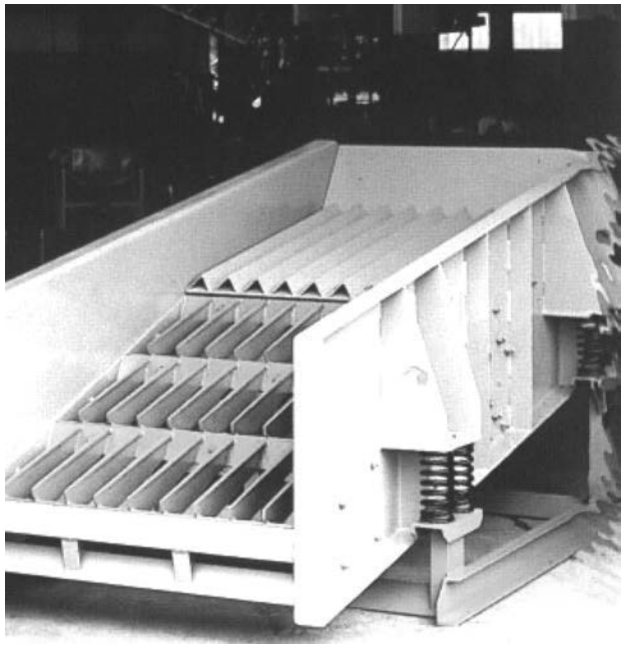


Figura 9.11. Criba vibratoria.

El objeto de separar este material es conseguir que la roca que se vaya a tratar en la planta sea más limpia, con lo que el material final obtenido tendrá mayor calidad.

En algunas instalaciones aún se suele aprovechar una parte de la fracción eliminada, mediante otro cribado posterior. En uno y otro caso, al final se obtiene un material constituido esencialmente por las tierras arcillosas y/o limosas que constituyen un verdadero residuo. Una salida a este material lo constituye el relleno de capas de separación en los vertederos de RSU. Otro aprovechamiento consiste en su empleo como materia prima para la industria cerámica y/o la fabricación de clínquer, siempre que la caracterización sea adecuada.

En el caso de trituración en medio líquido (sistema empleado para la extracción de algunas arcillas, como las «*ball-clays*») se generan lodos, donde el principal problema es la humedad que produce una gran inestabilidad en las balsas de lodos. Por ello se ha trabajado mucho en la recuperación de sólidos

con tamaños superiores a 30 mm contenidos en los efluentes, mediante etapas de hidrociclones operando con escurridores vibrantes. Cuanto más fino es el tamaño de partícula, mayor cantidad de agua retiene.

b) *Generados por la utilización de la maquinaria móvil*

En esta zona es necesaria la presencia de palas cargadoras para poder cargar los camiones de clientes con los productos finales, también han de cargar los propios camiones que transportan el exceso de productos fabricados hacia los stock generales. Por tanto, los residuos generados por la maquinaria móvil suelen ser los mismos que los generados en el frente y transporte: aceites usados, filtros, baterías, piezas de acero desgastadas o rotas y neumáticos.

c) *Otros*

En la actividad general, puede considerarse que se utilizan dos tipos de aguas; por un lado las aguas residuales que provienen de los servicios del personal y, por otro, las que puedan producirse como consecuencia de su utilización para el lavado de determinadas rocas en casos especiales.

Las aguas procedentes del lavado de la roca van cargadas con tierras, arcillas y limos que, en algunas explotaciones, es preciso eliminar por vía húmeda para que no contaminen la roca que se ha de tratar en la planta.

La clasificación de los residuos, que se lleva a cabo en algunos países conduce a confusiones en la definición: así un agua residual cargada con una determinada cantidad de contaminante, no se considera agua residual sino residuo líquido, lo que supone un tratamiento diferenciado y específico. Esta anotación viene al caso de que, en España, los residuos mineros cuentan con su propia definición y límites de contaminantes que se apartan mucho de los límites establecidos por Medio Ambiente. Ello, desde el punto ambiental no tiene ninguna lógica: la cantidad de contaminante que las directivas ambientales consideran dañinas en las actividades industriales, también lo son para las mineras, cuyo reglamento depende de otro ministerio. A todo ello hay que añadir que los residuos mineros se generan en cantidades de varios órdenes de magnitud superiores a los industriales y, en caso de accidente, las consecuencias y alcance serán también muy superiores. Basta recordar la rotura de la balsa de residuos de Aznarcóllar (sur de España): las consecuencias fueron catastróficas.

Para evitar posibles afecciones ambientales por contaminación del propio terreno en caso de rotura de alguno de los recipientes del aceite, aunque improbable no imposible, es necesario almacenarlos en un lugar preparado al efecto. En España, como en casi todos los países de la UE, el aceite mineral usado está considerado residuo peligroso y debe entregarse a un gestor autorizado (suele existir uno por Comunidad Autónoma), mientras que en otras latitudes con otras leyes y fuerte actividad minera, una parte del aceite se emplea como explosivo (esta práctica está prohibida en España). En cuanto al gas-oil, indicar que las explotaciones mineras son grandes consumidoras de este combustible ya que suelen disponer de una importante cantidad de máquinas que funcionan con él.

La solución para la alimentación del mismo es montar en las propias instalaciones un depósito regulador, superficial o subterráneo, abastecido por el camión cuba del distribuidor y un surtidor para el llenado directo del depósito de cada máquina.

En este caso, como en lo anteriormente comentado, es necesario tomar las medidas adecuadas para que la instalación y las operaciones de descarga cuba-carga depósito y la de carga del depósito de las máquinas no provoque una contaminación no deseada.

3.1.3. Gestión de los residuos generados

Es importante realizar una correcta gestión de todos los residuos que se ocasionan durante la actividad minera. En primer lugar se ha de actuar de manera tal que su eliminación no provoque una nueva afección ambiental.

En el caso del aceite, para evitar cualquier tipo de impacto negativo, se debe proceder de manera correcta y segura. Se ha de buscar un lugar apropiado, no se puede realizar el cambio de aceite en cualquier sitio. Lo más adecuado sería realizarlo en un taller con foso; en el caso de no disponer de foso se debe preparar una superficie impermeable, bordeada por tres de sus cuatro lados e inclinada hacia el lado opuesto al de entrada de la máquina, donde se pueda recoger de inmediato las cantidades que se puedan verter durante la operación de cambio de aceite. Con esta forma de proceder se asegura la no contaminación del terreno.

Los aceites usados se han de almacenar en recipientes adecuados, como muestra la Figura 9.12, hasta que el correspondiente gestor de este tipo de residuos pase a recogerlos. El lugar más apropiado

Figura 9.12. Almacenamiento temporal de aceite mineral usado.

para almacenarlo, hasta su retirada, ha de ser una superficie preparada con suelo impermeable y con bordes de suficiente altura, formando una cubeta para que quede confinado en caso de rotura de algún recipiente.

En el caso de los aceites vírgenes, a utilizar por la maquinaria, para evitar una posible contaminación son muy utilizados los cajones de obra, o cubetas, impermeabilizados, con bordes para contención del aceite en caso de rotura de algún envase; la altura del borde no ha de ser exagerada por motivos prácticos de manipulación, se debe calcular para contener el volumen de aceite del recipiente de mayor cabida.

Los demás residuos se han de almacenar, hasta el momento de su retirada por el correspondiente gestor, de manera que estén completamente ordenados y seguros; generalmente se utilizan contenedores para cada tipo específico, donde el gestor los recogerá.

El residuo terroso obtenido en la primera etapa de la planta de tratamiento se elimina hacia los frentes de cantera que han llegado a su estado final, para utilizarlo como relleno en las operaciones de restauración.

En el caso de las aguas de servicios de personal se han de conducir a estaciones depuradoras propias y adecuadas al número de personas que las han de utilizar. Deben estar homologadas para que su vertido sea correcto y quede aprobado por el Organismo correspondiente.

Las aguas de lavado de la roca se envían a balsas decantadoras para que vayan depositando en el fondo sus partículas; cada cierto tiempo se limpia el material depositado en el fondo y se envía a los frentes en restauración. El agua una vez limpia y clarificada se puede reutilizar o verter a cauce público.

Para el sistema de gas-oil, se ha de preparar, como en el caso de los aceites, una cubeta para contención del mismo en caso de rotura o vertido, como sugiere la Figura 9.13. Sería más apropiado que el depósito estuviese al aire libre o en instalación subterránea, además de ser un depósito homologado.

Figura 9.13. Almacenamiento de carburante.

La nueva normativa ambiental (IPPC), que afecta a todas las actividades incluida la minera, exige que en los proyectos iniciales de apertura, que han de ser aprobados por los respectivos Organismos Oficiales de cada Comunidad Autonómica, se considere y estudie todas las posibles afecciones que la actividad extractiva pueda ocasionar sobre el medio ambiente y se les busque una lógica solución, proponiendo las medidas correctoras de todos los efectos negativos que se produzcan o, en el caso que su eliminación total no pueda conseguirse, que se reduzca los efectos a valores que permitan cumplir con la legislación correspondiente.

En el caso de las actividades extractivas, reguladas desde los primeros años de la década de 1980, por una abundante legislación medioambiental, existe otras exigencias ambientales para los efectos contaminantes que se producen, que se describirán a continuación.

3.2. OTRAS AFECCIONES AMBIENTALES EN LA MINERÍA

Las actividades extractivas están obligadas, con carácter previo a su inicio, a presentar, además de los

correspondientes proyectos de explotación, un Estudio de Impacto Ambiental (EIA).

Un EIA tiene por objeto fundamental estudiar de manera muy detallada la actividad que se quiera implantar, sus procesos productivos y las afecciones que la misma pueda ocasionar sobre el territorio y sobre el entorno. Se ha de extender el proceso de estudio a otros territorios aptos para la implantación y, finalmente, promover la implantación definitiva en aquel territorio que menos afectado resulte, es decir, el más favorable y mejor receptor de la actividad.

Desgraciadamente, las explotaciones mineras casi nunca tienen esa oportunidad de poder elegir el territorio entre varias opciones, pues las rocas están ubicadas en un terreno muy definido y es en esta ubicación donde se ha de explotar. Por tanto, y en este aspecto, la minería está en desventaja respecto a las actividades que tienen varias opciones de elegir el lugar más adecuado y que más fácilmente minimice los impactos.

Sin embargo, aplicando los mismos criterios, sí que se puede elegir, dentro del terreno donde se encuentra la masa rocosa a extraer, el lugar más apropiado para, desde el punto de vista ambiental, iniciar la explotación, ubicar las instalaciones y también definir cómo se han de desarrollar los futuros frentes para que las afecciones sean mínimas. Es aquí donde los técnicos redactores de los proyectos han de proponer la mejor solución.

Y esa propuesta tiene que quedar establecida desde el principio pues no es fácil realizar cambios en la ubicación y disposición de los frentes una vez han sido iniciados, ya que se necesita un cierto tiempo para conseguirlo y preparar la infraestructura de acceso a los mismos.

Los principales efectos que la actividad extractiva origina sobre el entorno son los siguientes: polvo, ruido, vibraciones, impacto visual, eliminación de la flora, del suelo edáfico, de la morfología y desplazamiento de la fauna de su hábitat.

Figura 9.14. Impacto de una voladura.

El polvo y el ruido se originan en los siguientes puntos e instantes: a) en el frente en el momento de la voladura, como muestra la foto de la Figura 9.14; b) por el movimiento, sobre plazas y pistas mineras, de los vehículos que transportan la roca hasta la planta de tratamiento y por los vehículos de clientes que transportan los productos finales, como muestra la Figura 9.15; durante el movimiento de la roca en la planta de tratamiento (Figura 9.16); especialmente importante es el efecto pulvígeno producido por las fracciones más finas cuando existen importantes alturas de caída.

Figura 9.15. Producción de polvo durante el transporte de roca.

Las vibraciones son originadas por la utilización de explosivos en las voladuras y también se producen en la planta de tratamiento.

Figura 9.16. Acciones de limpieza de la vegetación tratamiento.

Una vez eliminado todo lo existente sobre el macizo rocoso es el momento de extraer la roca y crear el hueco, que afecta de forma importante a la morfología.

Figura 9.17. Impacto visual de una explotación en pendiente.

El impacto visual se está produciendo desde el instante inicial en que se empieza a eliminar la vegetación; su importancia dependerá de la situación de los terrenos respecto al entorno, de la tipología del entorno y de si el terreno afectado es, o no, monocromático; las instalaciones y edificios que dan servicio a la actividad extractiva son en ocasiones elementos productores de impacto visual y los acopios de áridos pueden producir impactos verdaderamente importantes.

Se ha de considerar el impacto visual que puede provocar la pista minera que une los frentes con la planta de tratamiento y cualquier acceso a la montera de la explotación que sea necesario construir aunque sea provisional.

También puede ser incrementado el efecto visual durante la vida de la explotación por la construcción de nuevas instalaciones, futuros edificios; si en algún momento se produce, en un punto determinado, afección por puesta en movimiento de masas importantes de polvo, este efecto pulvígeno puede representar o aumentar el impacto visual.

3.3. CÓMO EVITAR O ELIMINAR ESTOS EFECTOS AMBIENTALES

En los apartados siguientes se describen los principales impactos de la minería de materiales para la construcción, así como las medidas correctoras.

3.3.1. Acciones contra el polvo

Para ello se puede proceder al cubrimiento de los puntos contaminantes de las instalaciones, uso de captadores y riego microscópico en las zonas de caída del material, como muestra la Figura 9.18, de las zonas de paso y mantenimiento adecuado de las mismas, pantallas arbóreas. Un ejemplo lo representa el sistema de protección en el esquema de la Figura 9.19 y control de la velocidad máxima de los vehículos.

Figura 9.18. Riego convencional en la explotación minera.

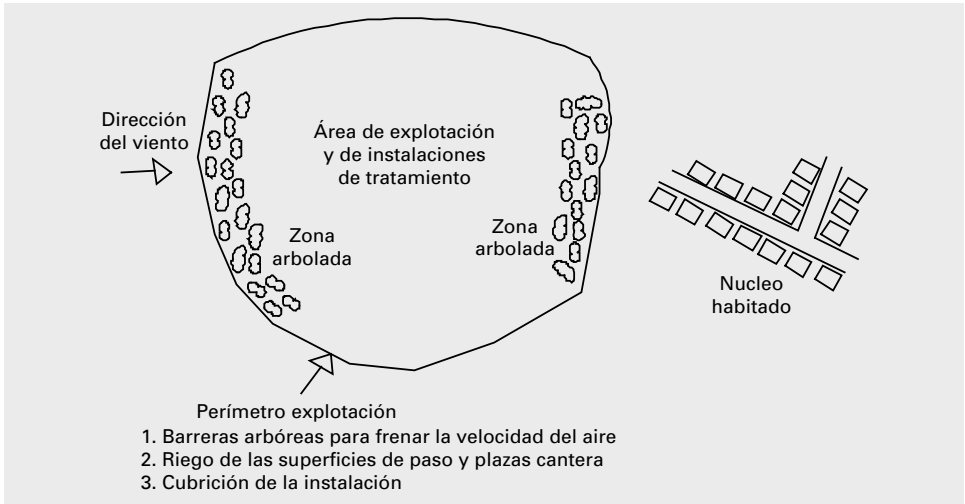


Figura 9.19. Acciones contra el polvo.

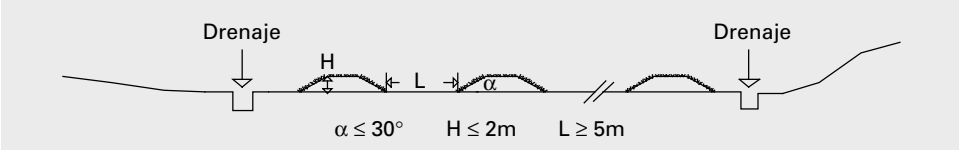


Figura 9.20. Acopio de suelo edáfico.

El polvo producido en los frentes de explotación por manipulación de la roca, en las pistas mineras y en las plazas puede ser atenuado regando, mediante cuba, con la periodicidad que requieran las condiciones atmosféricas en cada momento.

3.3.2. Acciones contra el ruido

Cubrimiento de las instalaciones, sustituir el acero por el caucho en las zonas de paso y caída de materiales durante su procesamiento, barreras físicas interpuestas y alejamiento de la actividad de los centros habitados. En las voladuras evitar que se produzca onda aérea por retacados incorrectos y por explosión de cordón detonante en el exterior del barreno.

3.3.3. Acciones contra las vibraciones

Maquinaria asentada sobre bancadas adecuadas y cargas operantes bajas en las voladuras; cumplimiento de la Norma UNE 22381 mediante el control, con el sismógrafo, de las vibraciones producidas.

3.3.4. Acciones contra la destrucción del suelo edáfico y desplazamiento de la fauna

En las primeras etapas de la actividad, es muy importante la extracción selectiva del suelo existente sobre el terreno a explotar, evitando que se pierda al mezclarse con otras capas de materiales. También lo es el acopio adecuado del mismo, como muestra la Figura 9.20, para que sus características no se vean alteradas hasta el mismo momento de utilizarlo para la restauración. Si en el momento de la restauración final el suelo existente es escaso, será necesario fabricarlo; esta solución es muy cara, de ahí la importancia que adquiere una buena gestión en la recuperación del suelo edáfico existente.

Está demostrado que cuando la restauración se realiza adecuadamente y como consecuencia se vuelve a recuperar el suelo edáfico y la vegetación, la vida animal vuelve a colonizar los terrenos restaurados.

3.3.5. Acciones contra la eliminación de la flora

Para preservar la flora autóctona, algunas explotaciones mineras, como muestra la Figura 9.21, crean un vivero que les permita reimplantar en un futuro las especies que se verán afectadas.

Figura 9.21. Vivero para la replantación de flora autóctona.

Es importante salvar las especies que sean recuperables y plantarlas en lugar adecuado hasta su uso posterior. En las operaciones de restauración se debe construir una buena base de estériles sobre la que se colocará el suelo edáfico para que la flora implantada se pueda desarrollar fácilmente y consolidar en el territorio. Aquí es muy importante elegir las mismas plantas que existían inicialmente pues son plantas que se adaptan a la zona. Es clave la elección de la estación del año más adecuada para llevar a cabo la plantación; también conviene establecer los riegos y cuidados necesarios en los primeros años hasta que las plantas se consoliden.

3.3.6. Acciones contra la pérdida de la morfología

Reconstrucción morfológica de taludes y huecos con los estériles generados en la propia actividad. Cuando se disponga de escombros estériles procedentes del campo de la construcción se puede conseguir la recuperación morfológica. En este caso la recuperación puede ser total si se dispone de cantidades adecuadas (ver Figura 9.22).

Además de lo beneficioso que es recuperar la morfología, en el caso de los escombros de construc-

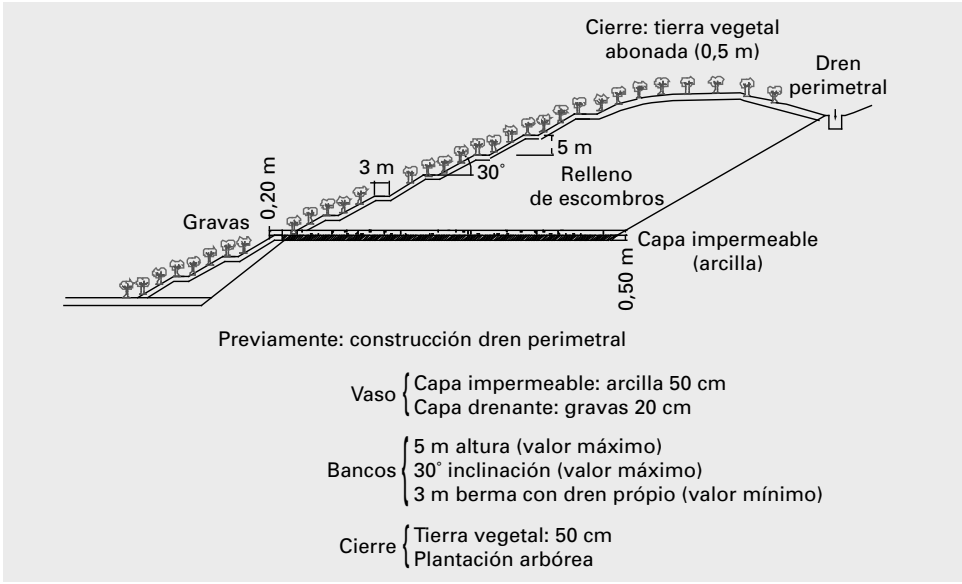


Figura 9.22. Acciones contra la pérdida de morfología.

ción se produce un efecto beneficioso añadido, como es el eliminar los residuos procedentes del campo de la construcción y mientras no se consiga que su valorización actual alcance mayores cotas constituye un verdadero problema de eliminación.

3.3.7. Acciones contra el impacto visual

La Figura 9.23 muestra el aspecto de una cantera abandonada una vez terminadas las labores de explotación.

Contra el impacto visual se puede actuar mediante el diseño adecuado de los frentes de explotación apoyado en un estudio de visuales (analizando diversas perspectivas, como quiere mostrar la Figura 9.24, utilizando pantallas visuales, tanto para los frentes y pistas mineras como para las propias instalaciones y acopios, afectación de la menor extensión de área posible, restauración integrada o progresiva del hueco generado intentando mantener una superficie constante de afección lo más reducida posible.

La eliminación de morfología, suelo edáfico, flora, fauna y creación de impacto visual, se produce ya en la primera etapa de la actividad. Ello es debido a que para extraer la roca industrial es necesario, primero, eliminar todo tipo de vegetación existente sobre el terreno a explotar (ver Figura 9.24), a continuación extraer de manera selectiva el suelo edáfico que se reservará en acopios apropiados; lógicamente, la vida animal existente ya no estará presente desde este momento.

Figura 9.23. Cantera abandonada.

Figura 9.24. Aspecto de la cantera en función del angulo de visión.

3.4. ESTRUCTURA DE LA RESTAURACIÓN PARA UNA ACTIVIDAD EXTRACTIVA

Un programa de restauración de una actividad extractiva se puede estructurar, según la normativa en vigor, en los siguientes grandes apartados:

1. Estudio del estado inicial.
2. Descripción de la actividad.
3. Identificación de los efectos de la actividad sobre el medio.
4. Medidas a tomar para eliminar o atenuar los efectos.
5. Redacción del proyecto de restauración.

En las siguientes tablas se resume el contenido de cada uno de los cuatro primeros apartados.

El proyecto de restauración se desarrollará, en cada caso, adaptándolo al resultado que surja del apartado cuarto, donde claramente se expondrán las acciones necesarias a realizar para eliminar o atenuar cada uno de los efectos perniciosos que la actividad ocasione sobre el medio ambiente.

La restauración será un proyecto formal, que constará de Memoria, Presupuesto, Planos, Pliegos de Condiciones, Documento de Seguridad y Salud para la ejecución de la restauración. Se debe indicar en un cuadro el momento adecuado para iniciar cada una de las medidas de recuperación del medio.

Finalmente se representa un diagrama de flujo sobre el trámite a seguir y plazos de un EIA hasta obtener la Declaración de Impacto Ambiental (DIA).

Tabla 9.5. Cuadro resumen del estado inicial

Descripción del estado inicial	Contenido
a) Situación geográfica	• Plano de situación E 1:50.000, indicando el paraje. • Términos municipales.
b) Perímetro de la actividad	• Topográfico terrenos y entorno, coordenadas UTM. • Señalar diferente utilización del área (acopio, pistas...).
c) Propiedad. Servidumbres	• Indicar propietarios fincas afectadas. • Servidumbres existentes en los terrenos a explotar, alternativas en caso de modificación (red A.T.,...).
d) Situación urbanística	• Calificación del terreno, cambio de uso.
e) Infraestructuras afectadas	• Caminos, carreteras, puentes, pesos máximos, incremento densidad de tráfico. • Tendido eléctrico, distribución de agua, teléfono, gas.
f) Situación en espacios especiales	• Áreas de protección natural, parques, espacio especial.
g) Estudio climatológico	• Pluviometría, temperaturas, vientos predominantes, valores medios y máximos.
h) Estudio geológico, hidrológico e hidrogeológico	• Permeabilidad, nivel freático, líneas de flujo, inventario captaciones, drenajes, calidad del agua.
i) Estudio del suelo	• Espesor horizontes, evaluación. • Técnica decapaje más adecuada. • Posibilidad de colocación inmediata o acopio. • Muestras representativas, y análisis fisicoquímicos. • Posibilidad de mejora, enmiendas necesarias.
j) Estudio de fauna y vegetación	• Características fauna. • Inventario especies vegetales. • Factores: exposición solar, humedad.
k) El paisaje. Estudio de visuales	• Caracterización del paisaje: relieve, vegetación, color, artificialidad, edificación, visuales.
l) Ruido y calidad del aire	• Determinación focos y niveles existentes.
m) Socioeconomía de la zona de influencia	• Población activa y sectores económicos. • Patrimonio artístico-cultural. • Parajes especial interés natural. • Otros usos y aprovechamientos.

La Tabla 9.6 sintetiza los aspectos principales de la actividad a realizar.

Tabla 9.6. Descripción de la actividad

Actividad	Decapaje suelo edáfico	Estériles	Mineral/Roca
NATURALEZA			
a) Descripción.	X	X	X
b) Superficie afectada (plano topográfico).	X	X	X
c) Cubicaciones.	X	X	X
TÉCNICA			
a) Voladura: tipo y frecuencia.	—	X	X
b) Extracción mecánica: tipo máquinas, forma de trabajo.	X	X	X
c) Geometría del frente.	—	X	X
d) Taludes.	—	X	X
FASES DE EXTRACCIÓN/EXPLOTACIÓN			
a) Inicio y apertura.	X	X	X
b) Calendario de las fases.	X	X	X
TRANSPORTE:			
a) Interior:			
1) Infraestructura desde frentes explotación.	X	X	X
2) Maquinaria necesaria y ritmo de trabajo.	X	X	X
b) Exterior:			
1) Red viaria afectada	—	—	X
2) Estudio sobre su influencia (carga, densidad,...).	—	—	X
INSTALACIONES DE TRATAMIENTO			
a) Ubicación.	—	—	X
b) Técnica tratamiento.	—	—	X
c) Consumos energéticos (diagrama de flujo).	—	—	X
d) Movilidad de las mismas (caso de graveras).	—	—	X
e) Productos obtenidos (cantidad, tipo).	—	—	X
f) Vertidos producidos (tratamientos).	—	—	X
ACOPIOS			
a) Ubicación.	X	—	X
b) Tamaño/forma.	X	—	X
ESCOMBRERA			
a) Geometría y situación.	—	X	—
b) Drenaje y estabilidad (tipos, altura e inclinación talud,...).	—	X	—

Tabla 9.7. Efectos. Criterios evaluación. Límites y control

Efecto	Origen	Lugar de afección	Criterio de evaluación	Limite tolerable	Posibilidad de control
Visual	Denudación por explotación. Construcciones auxiliares. Instalaciones de tratamiento. Construcción escombreras. Vegetación destruida. Modificación topográfica. Geometrías regulares.	En el mismo paisaje. Desde vías de comunicación. Desde núcleos habitados próximos.	Estudio de visuales. Métodos de cuantificación adecuados a cada caso.	Subjetivos. Por razón paisajística.	Nueva localización. Pantallas visuales. Conservar vegetación de alrededor. Suavizar línea. Reconstrucción topográfica. Revegetar y reforestar.
Atmosférico	Polvo: En la operación extractiva. Movimiento de materiales. Transporte interno. Carga y descarga. En planta de tratamiento. Gases: En escombreras de carbón. De la maquinaria (arranques, en movimiento). En sitios de tratamiento.	En la zona de extracción. En zona de escombrera. En la red viaria interna. En la zona de tratamiento.	Estimación de niveles de contaminación a emitir y su percepción en determinados lugares.	Legislación vigente.	Polvo: Adecuación y mantenimiento pistas (pavimentación, riego). Límite vel. en puntos clave. Revegetación rápida. Pantallas absorbentes. Utilizar cintas transportadora. Captadores de polvo. Cubrir instalaciones. Gases: Extinción puntos combustión espontánea del carbón.
Edáfico	Desaparición suelo edáfico. Mezcla de suelo y estéril. Mezcla de horizontes. Almacenamiento defectuoso del suelo. Creación de zonas susceptibles a la erosión Relleno materiales no aptos. Aguas contaminadas.	En el área de explotación. En el área de escombrera. En zonas de cultivo inmediatas debido a contaminación de aguas.	Evaluación en función del uso posterior del terreno. Determinación de la potencialidad e idoneidad según usos.	En función del uso posterior Muy exigente para uso agrícola.	Buena técnica de decapage. Conservación del material edáfico.
Acústico	Maquinaria en el frente. Transporte interior. Instalaciones de tratamiento. Voladuras. Transporte exterior.	En el área de explotación. En las proximidades.	Por comparación entre nivel de ruido antes y después del inicio de la actividad.	Legislación vigente (Ordenanzas municipales). Niveles máximos no sean molestos para personas o núcleos habitado situados en la proximidad.	Pantallas antisonoras. Cintas en lugar de volquetes. Pistas alternativas. Recubrir con goma puntos de caída de material. Silenciadores en equipos. Cubrir instalaciones. Cubrir con arena cordón detonante al aire y reducir al máximo taqueos. Retacado correcto barrenos.
Geotécnico	Vibraciones debidas a: Trabajos en el frente. Voladuras. Operaciones de preparación y tratamiento. Morfología de taludes. Variación de la capacidad portante del terreno. Estabilidad de escombreras.	Zonas de influencia de las vibraciones. En el área de explotación.	Estudio de efectos de voladuras. Estudios de estabilidad de taludes. Características requeridas a los terrenos en función de los nuevos usos previstos.	Legislación vigente control vibración (UNE 22381). Evitar deslizamientos taludes. Características geomecánicas del terreno adecuadas para su uso posterior.	Reducir carga operante de las voladuras. Ángulos de talud estables. Elección ubicación escombrera. Métodos de relleno y compactación adecuados. Drenaje adecuado. Revegetación rápida.
Morfológico	Creación huecos explotación. Escombreras exteriores. Acopios materiales. Diseño estado final (taludes).	En el área de explotación. En zona de escombrera.	Cambio respecto al estado inicial. Persistencia del impacto en el tiempo.	Adecuación paisajística. Pendientes en función del uso final del terreno.	Recuperación de formas. Suavizar curvas nivel y pendientes, evitando aristas. Escombrera adaptada a la morfología entorno (no interferir línea horizonte). Pantallas visuales.
Hidrogeológico	Aguas superficiales: Sedimentos. Contaminantes químicos. Efectos térmicos. Aguas subterráneas: Modificación niveles freáticos y piezométricos. Contaminación.	Aguas del área explotación. Red de drenaje. Vertidos exteriores. Captaciones aguas próximas. Acuíferos en general.	Calidad del agua según uso. Grado alteración niveles y recarga acuíferos.	No alterar calidad agua. Evitar daño a comunidades. Cumplir Legislación vigente.	No destruir filtros naturales o reconstruirlos. Aislar materiales disgregables y contaminantes del agua. Crear barreras perimetrales. Tratamien agua contaminada. Control de sedimentos y aceites máquinas. Restituir red natural drenaje.

Tabla 9.7. *(Continuación)*

Efecto	Origen	Lugar de afección	Criterio de evaluación	Limite tolerable	Posibilidad de control
Infraestructuras	Transporte área explotación. Incremento tránsito. Alteración topográfica. Influencia sobre otras redes.	Red viaria interior y exterior. Red de drenajes. Red de captación-conducción de aguas. Otras redes.	Cambio de parámetros. iniciales de la red viaria Por efectos directos sobre cualquier otro tipo de red.	Normativas (carreteras, etc.). Funcionamiento correcto.	Adecuación nueva red viaria. Cambio de situación redes. Practicas de conservación. Estaciones de lavado. Señales de tráfico.
Socioeconómico	Cambio de uso del terreno. Deterioro del paisaje. Puestos de trabajo. Actividad económica. Patrimonio cultural.	Otra empresas del sector en competencia. Personas sin trabajo. Edificios o área singulares.	Según el tipo de efecto y sus consecuencias.		Recuperar zonas afectadas para su uso tradicional. Alternativas a usos perdidos. Recuperación y traslado obras antrópicas.

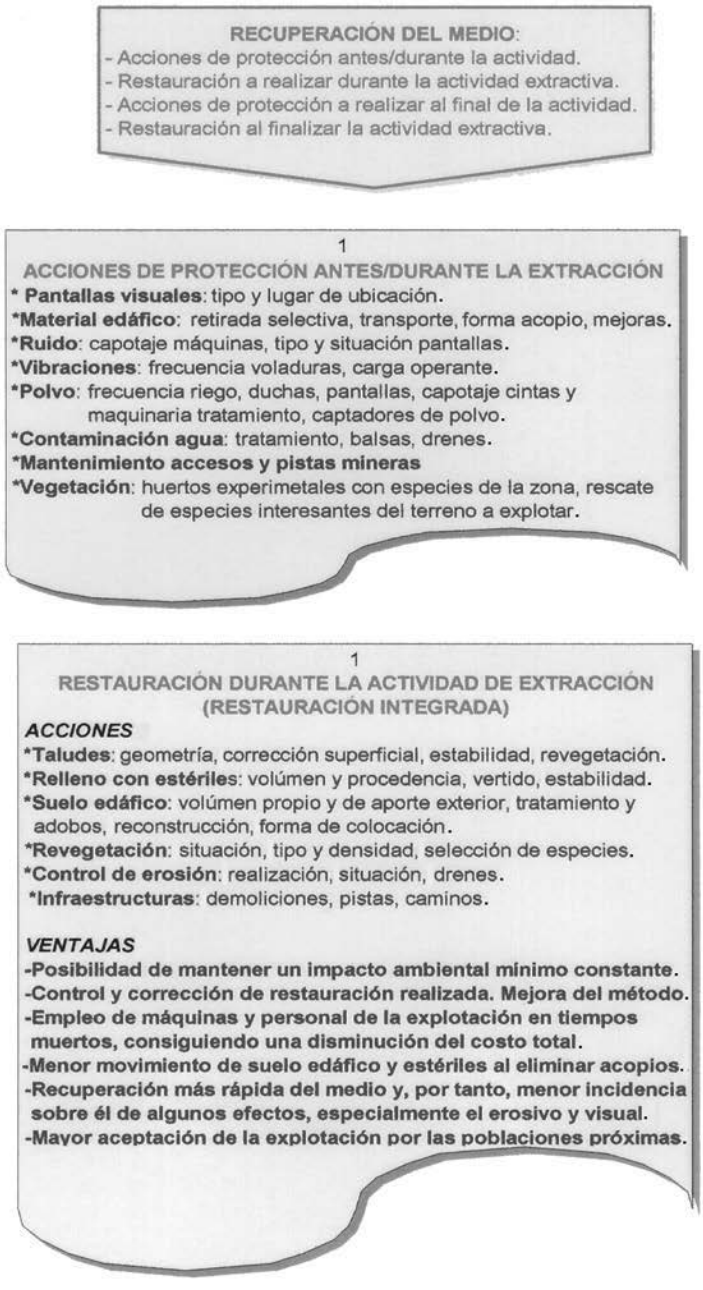


Figura 9.25. Plan de trabajo de la protección/restauración.

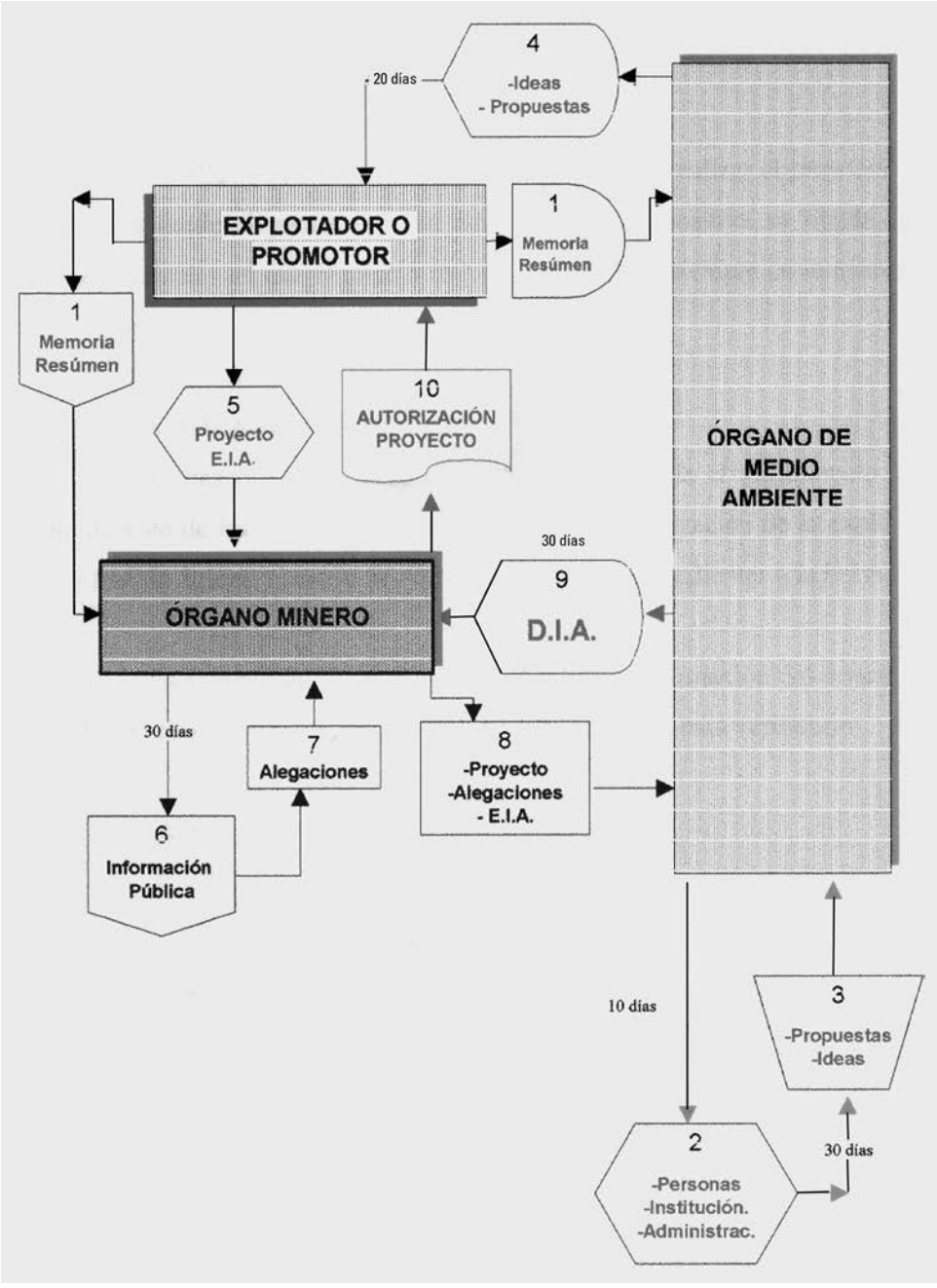


Figura 9.26. Esquema de procedimiento de la explotación.

3.5. IMPACTOS PRODUCIDOS POR LA EXTRACCIÓN DE ÁRIDOS EN GRAVERAS

Las extracciones de áridos naturales, asociados a la dinámica fluvial, y situadas en las terrazas de los ríos produce una serie de impactos que se analizan a continuación. Los criterios de valoración y estudio de impacto serían válidos para las graveras de montaña o "pie de monte", constituidas fundamentalmente por acumulaciones detríticas procedentes de la erosión de los relieves vecinos, asimilándolas a los efectos que producen las extracciones en terrazas antiguas, sin contacto con lámina de agua.

Como en el resto de las explotaciones lo primero que se hace es preparar el terreno a excavar, limpiándolo y eliminando la masa arbórea, arbustiva y herbácea; a continuación se elimina la capa de suelo existente. Los efectos generados en esta fase son ruido, polvo, impacto visual y posible erosión del terreno desnudo.

Una vez preparado el terreno se realiza la extracción del árido mediante palas excavadoras o dragas, caso de extracciones bajo nivel freático, y camiones que lo transportan hasta la planta de tratamiento, donde se obtienen las diferentes fracciones granulométricas.

En determinados lugares las administraciones prohíben realizar la extracción del árido por debajo del nivel freático e incluso requieren que la cota del nivel inferior de extracción se quede por encima de su cota máxima y a una determinada distancia, variable según el lugar.

A los efectos ambientales típicos de estas fases de la actividad, extracción, transporte y tratamiento, como son ruido, polvo e impacto visual de los frentes, se han de añadir los correspondientes a la posible afección del nivel freático, procesos de inundación y erosión de la gravera, contaminación del agua por vertido directo y por la maquinaria utilizada.

Las graveras ocupan por lo general grandes extensiones de terreno por lo que en caso de extracción por debajo del nivel freático y consiguiente inundación de la misma, la elevada superficie expuesta puede dar lugar, en ciertas épocas del año, a una gran evaporación del agua contenida.

Recomendaciones y procedimientos para evitar los impactos han sido descritos en el apartado 2.1.2. Sin embargo, conviene remarcar los siguientes extremos:

- *Conservar el suelo edáfico.* Evitar que el suelo edáfico existente se pierda en las primeras etapas de preparación del terreno y almacenarlo convenientemente, procurando proteger su flora y fauna y que no pierda sus características fisicoquímicas. Recuperados morfológicamente los terrenos, colocar rápidamente la capa de suelo que ha sido almacenada.
- *Mantener la vegetación.* Tan pronto se haya recuperado la morfología final y colocado el suelo edáfico, se realizará, lo más rápidamente posible, la plantación de los árboles, especies arbustivas y herbáceas propias de la zona para evitar cualquier tipo de erosión.
- *Controlar el impacto visual.* No mantener afectadas grandes superficies. En ocasiones, con objeto de aprovechar la maquinaria de limpieza, se preparan superficies demasiado grandes. Sería recomendable destapar la montera necesaria para un tiempo de explotación comprendido entre 6 y 12 meses y si existe alguna zona arbolada, que pueda servir de pantalla visual, tratar de mantenerla activa hasta el «último momento»; un estudio de visuales nos acercaría a la solución ideal.
- *Protección del terreno.* En las explotaciones cercanas al cauce, dejar un macizo de protección suficientemente ancho, para poder hacer frente a las crecidas y grandes avenidas que se puedan producir; se tiene que evitar que esos caudales importantes de agua entren directamente en el hueco excavado y lo erosionen, provocando daños en la propia finca y en las colindantes.
- *Ruido y polvo.* Para evitar estos efectos es necesario situar la maquinaria de tratamiento en lugares alejados de zonas habitadas, interponer entre el origen del efecto y el objeto barreras físicas, cubrir y apantallar las instalaciones, riegos de zonas de maniobras y paso. Controlar y limitar la velocidad de los vehículos.
- *Efecto socioeconómico.* Para evitar afecciones a fincas vecinas y caminos, dejar un macizo de protección adecuada y un talud de acuerdo con el ángulo estable de cada material. Vallar y señalizar el hueco para evitar caídas de vehículos y personas, especialmente en horas nocturnas.

3.6. RECICLAJE Y VALORIZACIÓN DE RESIDUOS MINEROS

Existen explotaciones que pueden producir una gran cantidad de estériles. Es el caso de todas aquéllas que explotan un yacimiento de calidad variable y comercializan un determinado producto con unas características muy determinadas (color, propiedades físicas,...). Cuando la explotación llega a las zonas que no cumplen con esas especificaciones, el material extraído es enviado a la escombrera.

Algo parecido sucede en las canteras que producen losas de aplacar, utilizadas en la construcción de fachadas y muros. Las losas se obtienen aprovechando planos de estratificación que presenta el yacimiento *in situ*; durante el proceso de arranque del bloque del macizo, sobre todo cuando se realiza con explosivos, se produce la rotura y afección de una parte del bloque y, por tanto, se está generando un material que ya no se puede aprovechar para obtener la placa, por tanto, es un estéril. También a lo largo del mismo proceso de separación de la placa del bloque se pueden producir roturas parciales o total de la placa, impidiendo obtener la dimensión mínima. En

Figura 9.27. Acopio de estériles a pié de cantera.

Figura 9.28. Cantera de caliza blanca.

ambos casos el estéril suele ser enviado a la escombrera, aumentando el impacto visual de la explotación, como evidencia la foto de la Figura 9.27.

En la escombrera de la foto de la Figura 9.28, cantera «La Calma», término de Darnius (Girona, España) se explota la caliza blanca para su utilización en diversas aplicaciones donde esencialmente prima el color blanco. Debido a la exigencia de color se ha vertido un importante volumen de roca en la escombrera al no cumplir con dicha exigencia, hecho que ha impedido, en su momento, su utilización.

Este material estéril podría constituir un *input* de cualquier otra actividad minera, especialmente cuando suele estar formado por rocas que trituradas pueden presentar unas características suficientes para su utilización en la fabricación de hormigones, cemento, aglomerados, etc.

Una posible y fácil valorización de cualquier escombrera sería la instalación de un grupo móvil de trituración primaria que redujese el tamaño de la roca existente y, así, poder transportar la fracción obtenida en camiones hasta una planta donde se complete su tratamiento o, bien, utilizarla como relleno en alguna obra pública próxima. La Figura 9.29 muestra la formación de terrazas con estériles.

Otro material que acaba como residuo es el que proviene de los procesos de fabricación de las piezas de roca ornamental al ser tratadas en sus talleres de elaboración.

Figura 9.29. Formación de una terraza con estériles.

En el caso de la producción de losas y bloques, durante el proceso de fabricación de las diferentes piezas, se parte de un bloque, más o menos rectangular, adecuado al tamaño de la pieza final a conseguir que puede representar un 60% del volumen del bloque. Por tanto, en las primeras etapas de corte y desbaste se van eliminando los retales de roca que no son aprovechables, es decir se produce un volumen de estériles cuya cantidad depende del tamaño del bloque de partida, pero que fácilmente puede llegar a valores de un 30% del volumen inicial. Restará un 10% que se quedará mezclado con los lodos finales producidos en el corte y pulido.

El 30% de material estéril puede ser reutilizado y aprovechado pues se trata de roca ornamental, aunque sea en forma de trozos de pequeñas dimensio-

nes, tal y como muestran los diferentes conjuntos de la Figura 9.30.

La sociedad Torho S.A., en sus instalaciones de Tordera (Barcelona), recupera esos estériles que se producen en un taller anexo donde se elaboran piezas de roca ornamental. En un primer paso los tritura, obteniendo una granulometría (inferior a 3) mm. Esa fracción fina, obtenida por trituración, pasa al proceso de fabricación de los bloques o piezas de hormigón, formando la cara vista de los mismos y muy apreciados en la construcción de fachadas, solados y en mobiliario urbano.

Con la utilización de esta fracción, formando la cara vista de piezas y bloques de hormigón, se consigue aprovechar hasta un 90% el bloque de roca ornamental (ver detalle en la foto inferior de la Figura 9.30).

El 10% de roca restante se encuentra en los lodos y también es técnicamente recuperable, pero el costo de secado la puede hacer inviable, salvo que se pueda aprovechar algún flujo térmico de otro proceso industrial próximo para secar el material. Si no se puede recuperar esta fracción sólida es necesario gestionarla adecuadamente para su envío a un vertedero autorizado. En algunas zonas de Europa la legislación impide evacuar los lodos si no están secos. En este caso uno de los sistemas mas económicos es la instalación de un sistema de cogeneración y aprovechar los gases residuales para la eliminación de la humedad.

Estos procesos de valorización comentados pueden ser extrapolados a cualquier tipo de actividad minera donde se produzca un estéril. Siempre que sea posible se han de aprovechar, pues así se disminuye la cantidad de residuos beneficiando al medio ambiente a la vez que se consigue un mayor rendimiento económico del material arrancado en el frente.

Figura 9.30. Aprovechamiento de residuos mineros.

4. Impacto ambiental de la minería metálica

La minería, además de ser una de las actividades más antiguas que han acompañado el desarrollo del hombre, también es uno de los sectores que generan mayores impactos al medio ambiente (positivos y negativos). A lo largo de la historia, la minería ha ocasionado grandes perturbaciones en diversas partes del mundo, con graves problemas ambientales en forma directa e indirecta. Por esto, es imperioso detectar cada uno de los problemas para así llegar a soluciones correctas en materia de prevención y descontaminación.

La ley, riqueza de metal en un determinado mineral, suele ser muy baja. Ello ocasiona que la actividad minera metálica sea una de las mayores generadoras de residuos sólidos, cuestión que obedece a la gran cantidad de materia que debe remover en su proceso extractivo. De igual forma, las demás actividades que se dan en proceso minero, tales como flotación, lixiviación, concentración, fundición y las propias de apoyo generan una cantidad considerable de residuos sólidos.

La mayoría de las materias primas que son utilizadas en la actualidad, provienen del subsuelo. Estos recursos son tan importantes en la economía actual, que muchos países sustentan su desarrollo económico en los recursos que poseen, como es el caso de los países que cuentan con importantes reservas de minerales, como Chile, Perú, Sudáfrica, Australia, etc.

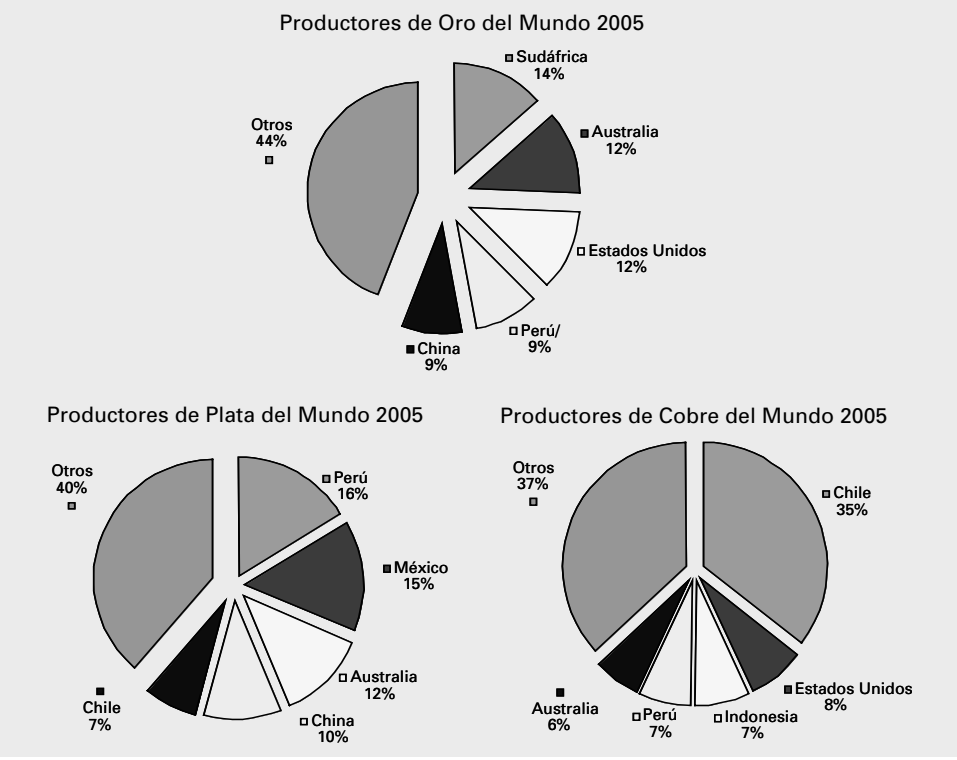


Figura 9.31. Participación en porcentaje de producción de los 5 mayores productores de oro, plata y cobre del Mundo en 2005. Estadísticas del Cobre y otros minerales, Comisión Chilena del Cobre (Cochilco, 2006).

Sin embargo, el gran desarrollo industrial experimentado en el siglo XX supone que las materias «primas secundarias», en especial lo referente a las chatarras férricas, cobre, cada día mayor relevancia. Así, en el caso del acero:

En el año 1970 en el mundo se produjeron 633 millones de toneladas de acero con el siguiente reparto:

- 62,7% a partir de mineral de hierro.
- 37,2% a partir de chatarra férrica.
- 0,1% a partir de DRI (*Direct Production Iron*).

En el año 2004 la producción superó los mil millones de toneladas (según la IISI, 1.057 millones de toneladas), mientras que las fuentes fueron:

- 60,4% a partir de mineral de hierro.
- 35,0% a partir de chatarra férrica.
- 4,6% a partir de DRI.

Es decir, aunque la obtención de acero a partir de chatarra haya disminuido en términos porcentuales, no lo ha hecho en valores absolutos ya que ha aumentado en cerca de un 60%. Para el año 2007 está previsto un incremento mundial de la producción de acero en un 4,9%, con lo que es de esperar que todas estas cifras se magnifiquen.

La Figura 9.31 muestras los principales productores de cobre, oro y plata, metales que junto con el hierro, que representan más del 90% de la producción mundial de metales han tenido, un gran significado en el desarrollo de la humanidad.

La minería como actividad ha acompañado al hombre en su desarrollo cultural y tecnológico, como lo atestiguan los remotos registros de la actividad humana, la búsqueda y extracción de trozos de la corteza terrestre, utilizados para la elaboración de armas y herramientas rudimentarias necesarias para su supervivencia; es tan antigua como el hombre mismo. Incluso marcando las etapas en el desarrollo de la humanidad, ligando su evolución cultural al material o elemento que mejoró su condición de vida, se puede observar el desarrollo del hombre a través de la historia marcado por los minerales determinantes o el desarrollo alcanzado en el trabajo con ellos: Edad de Piedra, Edad del Cobre, Edad del Bronce, Edad del Hierro, Revolución Industrial (uso del acero y carbón) y nuestra actual Edad Moderna marcada por el petróleo.

En los últimos dos siglos, la humanidad ha crecido en forma vertiginosa al igual que la producción minera, en gran medida gracias a la utilización de maquinarias, energía y tecnología, lo cual ha incrementado el impacto ambiental y la generación de residuos.

4.1. INTRODUCCIÓN A LA PROBLEMÁTICA MINERA METÁLICA

En general el crecimiento de esta actividad acompañada de un marco legal insuficiente para la protección del medio ambiente, provocó una explotación indiscriminada que distaba mucho de una extracción racional y sostenible alcanzando tales niveles de contaminación que difícilmente en la actualidad se vislumbra la forma de recuperación del daño causado al medio ambiente.

En los comienzos de la década de 1970 se empezó a percibir que junto con el desarrollo alcanzado, las secuelas indeseables del desarrollo incontrolado comenzaron a disminuir la calidad de vida lograda, forzando a tomar medidas que frenaran o mitigaran el daño causado al medio ambiente y al ser humano.

Con la globalización de los mercados se va gestando un cambio en los países no bastando con las políticas gubernamentales, las cuales se verán afectadas por acuerdos y tratados internacionales que forzarán a replantear estas políticas, provocando la necesidad de adaptarse rápidamente a los cambios que se produzcan a nivel mundial, en especial a las tendencias que marcan el desarrollo ambiental.

El desarrollo ambiental de la minería debe abordar la complejidad del manejo de los recursos naturales no renovables y sus residuos. Se trata de temas difícilmente separables de otras preocupaciones prioritarias en los ámbitos social y económico que obligan a pensar necesariamente en el largo plazo, en responsabilidades generacionales, ya que uno de los principales efectos es su operación y su rastro una vez finalizada la explotación.

4.1.1. Características de la industria minera metálica

La actividad minera posee singulares características que la diferencia y la convierte en una actividad muy particular, debido a los volúmenes extraídos, técnicas y procesos utilizados. Desde su inicio ha provocado diferentes problemas ambientales por la falta de conciencia en su manejo, el cual al ser un *recurso no renovable*, permite superar la capacidad de recuperación del medioambiente, sin que esta práctica afecte el rendimiento de la empresa, como sucedería con una industria dedicada a la explotación de recursos marinos.

La minería es una actividad que se consume a sí misma, es decir, que dado que sus recursos no se forman a escala humana, debe existir una intensa campaña de exploración de nuevos recursos para lograr cumplir con la demanda de los minerales extraídos. Ambientalmente esto se traduce en un gran impacto ambiental que será creciente a medida que las concentraciones de los minerales extraídos disminuyan o se profundicen, dado que se generará un mayor volumen de residuos lo que obliga necesariamente a orientar la gestión de dichos residuos para minimizar el impacto ambiental causado.

Para una mejor comprensión del tipo de actividad industrial y entender su comportamiento, es importante conocer sus singularidades:

- *Fuerte inestabilidad de los mercados y volatilidad de sus precios:* La inestabilidad del mercado de los minerales es una característica común a la mayoría de los bienes primarios. Sin embargo, la forma como esta característica se presenta en el mercado, la alta frecuencia e intensidad de las variaciones de la oferta y de la demanda (siempre con tendencia al alza) y, consecuentemente, de los precios de los minerales, destaca muy prominentemente a la industria minera sobre todas las otras.
- *Recursos no renovables:* Quizás el rasgo que más distingue y determina a la industria minera, es contar como fuente de su materia prima un recurso no renovable. Solamente para mantener esta capacidad, toda tonelada que se extrae debe ser reemplazada por otra, de igual o similar calidad. O sea, esta tonelada debe ser encontrada, desarrollada y preparada para su explotación, por lo que una actividad natural de este sector es una intensa exploración de nuevos yacimientos o sectores a explotar. Así, el yacimiento, en la medida que se explota, va agotándose y obviamente aumenta la generación de impactos ambientales y pasivos dejando el entorno muy alterado.
- *Ubicación geográfica:* En general las explotaciones mineras dependiendo del país, quedan alejadas de las poblaciones, las cuales, por otra parte buscaban estar alejadas de los sectores que en forma natural afectaban el desarrollo de la vegetación, al abastecimiento de agua, etc. El acceso, por lo general, resulta difícil por la asociación de los yacimientos a cordones montañosos poco atractivos para el hábitat humano. Con el tiempo, después de la explotación masiva de las minas se crearon campamentos para la extracción, sin que en un principio se

consideraran poblados a pesar de que en ellos se desarrollaba una actividad propia de una ciudad. Su característica de lejanía a las grandes urbes las mantuvo al margen de la preocupación de las autoridades por bastante tiempo.

4.2. IMPACTO AMBIENTAL POR EXPLOTACIONES MINERAS

Los procesos mineros generan impactos tanto sobre los componentes del medio ambiente como sobre los factores de tipo socioeconómico y cultural. Estos impactos se producen a través de todas las fases de la actividad minera, desde los inicios en la etapa de exploración, construcción, operación y cierre de la faena.

Los principales impactos y emisiones, sin olvidar que éstos dependen de las definiciones legales de cada país, que se generarán por la actividad minera serán:

- *Medio acuático:* El impacto dependerá de la ubicación de la faena, por el vertido de ciertos residuos al mar o la construcción de puertos, tranques de relaves, vertederos (escombreras, en terminología minera) y embalses.
- *Flora y fauna:* Por lo general por tratarse de faenas lejanas a los sitios urbanos, este impacto se evidencia por tratarse de una instalación industrial en un lugar con un bajo grado de presencia humana.
- *Residuos líquidos peligrosos y no peligrosos:* Este tipo de impacto está directamente relacionado con los procesos industriales que, a su vez, estarán condicionados por los insumos utilizados en el proceso y las características de la materia prima utilizada, junto al drenaje producido por el contacto con los minerales remanentes de la explotación con aguas de deshielo o lluvias, las cuales ven aumentada su capacidad de lixiviación dado que el macizo rocoso o el vertedero han incrementado la superficie de exposición y aumentado la carga contaminante.
- *Residuos sólidos peligrosos y no peligrosos:* Este tipo de impacto está directamente relacionado con los procesos industriales y, a la vez con la caracterización de los insumos empleados en el proceso y las características de la materia prima utilizada. En los apartados siguientes se explicará en mayor detalle las formas de valorización de residuos. En la Figura 9.32 se pueden observar centros de manejo de residuos de carácter industrial en una explotación minera.

Figura 9.32. Diferentes centros de manejo de residuos mineros, Chile.

- *Contaminación Atmosférica:* Otro aspecto a destacar es la emisión a la atmósfera procedente de la industria minera que se puede identificar bajo las etapas de beneficio del mineral y el tipo de proceso. La emisiones tienen una doble afección. Por un lado la toxicidad intrínseca de los componentes (metales, material particulado y componentes ácidos) y, por otro, la capacidad de transporte de los contaminantes ya que pueden encontrarse a miles de kilómetros del foco emisor (inmisión).

En la extracción de mineral, al tratarse normalmente de procesos físicos, la presencia de material particulado es la variable a considerar, junto a las emisiones de los equipos utilizados. Ello tiene gran relevancia en minería subterránea ya que es común el uso de la ventilación natural para lograr una correcta aireación. Esta práctica no suele ser suficiente para evitar un ambiente de trabajo con niveles de exposición sanitariamente adecuados por lo que normalmente se requiere el uso de mascarillas, lentes y tapones de oídos. En el caso de minas a cielo abierto, la polución está presente por las condiciones de encierro que provocan la forma geométrica (la corta) del rajo lo que conduce con frecuencia a una capa de inversión térmica que impide la evacuación de los gases y material particulado.

La Figura 9.33 muestra el efecto de la capa de inversión térmica en una mina de rajo abierto y su estado normal, de donde se infieren los problemas operativos derivados de esta situación.

Figura 9.33. Efectos de la capa de inversión térmica en una mina de rajo abierto y su estado normal.

Otros procesos comunes a la minería metálica, como cementación, extracción por solventes, electrólisis, etc., presentan situaciones similares en cuanto a extensión, lo que aumenta las emisiones (gases y vapores) de sustancias nocivas que dependerán del tipo de proceso utilizado, como cianuración, amalgamación, electrorefinación, etc., además del ruido generado por los procesos de chancado (trituración primaria) y molienda (trituración secundaria), junto a la cantidad de material particulado emitido.

En la Figura 9.34 se puede observar una planta de beneficio de minerales, en su sección de molinos de bolas, la cual en su periodo de funcionamiento tiene gran impacto acústico y emisiones de polvo en caso de no instalar medidas correctoras.

Los procesos de extracción y sus emisiones aun siendo importantes, no presentan el grado de extensión en comparación a los procesos de fundición que junto al material particulado generan emisiones que dependen del tipo de combustible utilizado, aditivos usados y mineral tratado.

La Figura 9.35 muestra una fundición de cobre en Chile, pudiéndose observar en la parte posterior los depósitos de escorias.

Una de las principales consecuencias de los avances en la legislación ambiental en el control de las emisiones es la internalización de las externalidades negativas, debido a que luego de captar en sistemas de filtros los elementos contaminantes, tienen la responsabilidad de reciclar, tratar, valorizar o disponer los elementos, asumiendo el costo ambiental de las emisiones a la atmósfera.

En la Figura 9.36 se pueden observar residuos provenientes de los filtros electrostáticos de fundición de cobre, cubiertos por una malla de color negra, que se encuentran ubicados en un campamento minero no habitado.

Figura 9.34. Planta de trituración secundaria, en la que se pueden observar los molinos de bolas.

Figura 9.35. Fundición de cobre en la tercera Región de Chile.

Por lo que hace referencia a los impactos directos de la minería metálica sobre el vecino poblado hay que resaltar:

- *Medio social:* En lo que se refiere al medio social, existe una variación en el valor de los terrenos que como en toda área industrial disminuye en sus cercanías. Revalora los posibles espacios de comercio y urbanizaciones al existir un potencial en el campamento que tiende a desarrollar un sector económico entorno a la mina. Este efecto ocurre en las etapas de construcción y operación de la mina, ya que la fase de cierre normalmente está acompañada de la disminución de las actividades.
- *Impacto vial:* Desde la etapa de construcción, que muchas veces implica el mayor movimiento, la actividad minera junto con alterar el medio social, proporcionalmente modifica la viabilidad de un sector, siempre en relación a su tamaño e importancia, desde variación en lo flujos, como en la infraestructura caminera, si ésta no se encuentra preparada para movimientos de alto tonelaje.
- *Paisaje:* tras la modificación del entorno, hay que sumar la subsidencia de los terrenos a la hora de tratarse de faenas subterráneas.
- *Acústica:* por su efecto el impacto de ruido está asociado a bajas extensiones, pero de gran continuidad en el caso de plantas de procesos (chancado, molienda, etc.) y de gran intensidad en el caso de voladuras.

En la Figura 9.37 se puede observar una tronadura que junto con material particulado genera gases a partir del explosivo utilizado.

- *Suelos:* Este tipo de impacto está principalmente asociado a contaminación de suelos por la existencia por vertederos de residuos (caso de depósitos arsenicales), contaminación de hidrocarburos e impactos que suman a la flora y fauna por las emisiones de fundiciones.

Figura 9.36. Polvos arsenicales de fundición de cobre, provenientes de captación de los electro filtros.

Figura 9.37. Voladura de mineral en una mina a cielo abierto.

La Figura 9.38 muestra una celda de seguridad para residuos mineros no peligrosos, en la cual los residuos están almacenados en un espacio confinado por geomembranas, que impiden el escape de lixiviados. Hay que señalar que esta práctica impide el reciclaje de los materiales y su posibilidad de ser valorizados.

La generación de residuos puede causar además contaminación de recursos naturales renovables, ya sean agrícolas, forestales o pesqueros, disminuyendo sus posibilidades comerciales.

Asimismo, la actividad minera puede afectar también los aspectos sociales, económicos y culturales de la sociedad, impactando sobre:

- Los beneficios económicos, directos e indirectos, derivados de la instalación del proyecto.
- La herencia sociocultural y los estilos de vida de la comunidad (monumentos naturales y arqueológicos, existencia de pirquineros, pueblos indígenas, tradición minera de la zona, consecuencias de la eventual remoción de sitios poblados, etc.).
- Las demandas de los recursos humanos.
- Las demandas de infraestructura física.
- Los consumos de recursos naturales necesarios para la operación.

La situación óptima, desde el punto de vista de las inversiones mineras, es que existan criterios y pautas de evaluaciones nacionales y en lo posible regionales, que permitan que una compañía minera pueda evaluar el impacto ambiental de un proyecto *a priori*.

Figura 9.38. Celda para el vertido de residuos mineros no peligrosos.

4.2.1. Actividades mineras típicas que impactan en el medio ambiente

La responsabilidad ética de una faena minera está en relación directa con su tamaño, la capacidad de su personal, su mercado y el volumen de sus utilidades. El objetivo de largo plazo que se pretende obtener al autoasignarse esta responsabilidad, es el de hacer de la actividad minera una actuación sustentable en el tiempo y respetada por la comunidad.

La sustentabilidad de la minería tiene relación con la percepción del público sobre su capacidad para internalizar los costos sociales de producción en la generación de utilidades. Al explotar recursos naturales no renovables, ser una actividad intensiva en

Figura 9.39. Planta de concentración de minerales, Chile.

el uso de tecnología y que genera bajo nivel de empleo, ser relativamente desconocida del público en general y al requerir altos volúmenes de capital, es indudable que la responsabilidad ambiental resulta en beneficio de la propia industria minera.

Por tratarse en su gran mayoría de materiales en los que su precio está fijado por bolsas de metales, el camino de incrementar sus utilidades viene dado por aumentar su eficiencia, o sea, disminuir los costos de producción. Lo que estaría de acuerdo con tomar medidas tendientes al reciclaje, teniendo en cuenta que esta tasa normalmente afecta a los procesos de extracción.

Tabla 9.8. Principales productores de plata en el mundo. Estadísticas del cobre y otros minerales, Comisión Chilena del Cobre (Cochilco, 2006).

PRODUCCIÓN MUNDIAL DE PLATA DE MINA (t de plata fina)						
Países	**2000**	**2001**	**2002**	**2003**	**2004**	**2005**
Perú	2.438	2.571	2.870	2.921	3.060	3.193
México	2.483	2.760	2.749	2.551	2.531	2.870
Australia	2.060	1.970	2.077	1.868	2.183	2.407
China	1.330	1.908	2.000	2.000	2.000	2.000
Chile	1.242	1.349	1.211	1.313	1.360	1.400
Polonia	1.088	1.231	1.342	1.332	1.330	1.263
Estados Unidos	2.017	1.606	1.419	1.236	1.246	1.219
Canadá	1.212	1.320	1.408	1.309	1.338	1.122
Kazakhstan	816	943	856	805	690	804
Rusia	240	400	400	400	400	400
Indonesia	335	348	289	377	377	377
Bolivia	434	410	461	466	413	372
Suecia	304	306	321	341	320	284
Marruecos	290	240	277	200	200	200
Uzbekistan	150	150	150	150	150	150
Otros	1.305	1.327	1.266	1.319	1.248	1.312
Total mundial	17.744	18.839	19.094	18.589	18.845	19.372

Como punto de interés hay que indicar que entre los países productores de dichas materias primas no figuran, normalmente, países industrializados (a excepción de EE UU como indica la Tabla 9.8), naciones en las cuales se encuentran los mayores mercados, por lo que en dichos países se generarán las mayores potencias de reciclaje.

La respuesta de algunos economistas es que los países industrializados tienen que aplicar un impuesto (Royalty) a la importación de ciertas materias primas (minerales, combustibles fósiles) cuya explotación «irracional» deteriora el medio ambiente y/o causa inequidad intergeneracional. Este impuesto también reportaría resultados benéficos a la economía de los países industrializados.

La Tabla 9.9 muestra una relación de posibles daños causados por la minería subterránea y de rajo abierto, en base a diferentes áreas de algunas actividades minerometalúrgicas típicas y una identificación de la forma en que pueden impactar al ambiente. Ellas han sido extraídas del Manual del Banco Interamericano de Desarrollo sobre procedimientos ambientales en el sector minero.

La Tabla 9.10 muestra las forma de explotación de minería a rajo abierto y sus impacto ambientales más significativos.

Algunos problemas ambientales derivados de la actividad minerometalúrgica que han causado amplia repercusión son:

- Contaminación del aire por emisión de gases y partículas respirables conteniendo metales pesados.
- Contaminación de suelos por material particulado, metales disueltos, pH y sales en efluentes líquidos.
- Contaminación de aguas superficiales, marinas y subterráneas por emisiones de efluentes líquidos conteniendo material particulado, metales disueltos, pH y sales.
- Contaminación y destrucción de recursos naturales renovables que absorben contaminantes desde el aire, las aguas y el suelo.
- Destrucción de paisajes, suelos y áreas silvestres por faenas mineras a cielo abierto.
- Fenómenos de subsidencia de suelos debido a faenas mineras subterráneas.

Tabla 9.9. Impacto ambiental debido a la minería subterránea (Manual del Banco Interamericano de Desarrollo sobre Procedimientos Ambientales en el Sector Minero).

Área ambiental		Riesgos	Causas
En el yacimiento rocoso	Recursos	Explotación. Pérdidas en la explotación. Otras pérdidas.	Explotación. Incendios subterráneos. Explotación irracional.
	Yacimiento rocoso	Hundimiento. Destrucción de partes del yacimiento afectado.	Apertura de la estructura subterránea.
	Aguas freáticas	Perturbación de las corrientes. Cambio de la calidad.	Afectación de las estructuras de la roca de caja. Apertura de la estructura subterránea. Manejo de aguas. Infiltraciones de aguas residuales desde arriba.
Mina subterránea	Aire	Ver tabla contaminación del aire por minería subterránea.	Ver tabla contaminación del aire por la minería subterránea.
	Ruido	Mayor carga de ruido.	Motores, perforaciones, voladuras.
	Polvo	Mayor carga de polvo.	Perforaciones, voladuras, trituraciones, cargamento.
	Aguas residuales	Ver tabla cambios del agua subterránea y de superficie.	
Mina a cielo abierto	Aire	Contaminación por emisiones subterráneas. Contaminación por emisiones a cielo abierto.	Contaminación por surgimiento desde el área subterránea. Polvo levantado de botaderos, gases de escape por uso de energía.
	Agua	Suciedad. Consumo.	Bombeo de aguas subterráneas, erosión de botaderos, almacenamiento y transporte inapropiado de insumos. Consumo para fines operativos.
	Superficie terrestre	Vibraciones. Hundimientos. Desgaste de la superficie. Cambio del paisaje.	Voladuras, movimientos de partes montañosas, asentamientos. Instalación de infraestructura. Formación de botaderos. Formación de botaderos, edificios, tala de bosques para maderamen. Asentamientos humanos secundarios.

- Riesgos y contaminación ambiental derivados de faenas y tranques de relaves abandonados.
- Los residuos sólidos de la minería pueden causar además contaminación del aire, agua y suelos, si no se hace una disposición adecuada de ellos.
- Altos costos en la descontaminación de recursos contaminados por actividades mineras y metalúrgicas.
- Extensión de las situaciones de contaminación de recursos naturales a la contaminación de personas, tanto en el ambiente comunitario como en el laboral.

4.2.2. Tratamiento de aguas ácidas de drenaje de minas mediante sistemas de tratamiento pasivos

En la mina de lignito Limeisa (Lignitos de Meirama S.A.) ubicada en La Coruña, España, se viene llevando a cabo un proyecto de investigación que busca alternativas de tratamiento para las aguas de drenaje; para esto se diseñaron y construyeron 2 líneas de tratamiento pasivo en la escombrera exterior de la mina donde se generan en forma continuada las aguas ácidas.

El esquema básico de tratamiento consiste en elevar el pH del agua y aportarle alcalinidad mediante un tratamiento con caliza, a fin de alcanzar condiciones

Tabla 9.10. Formas de explotación a cielo abierto y sus impactos ambientales más importantes (Manual del Banco Interamericano de Desarrollo sobre Procedimientos Ambientales en el Sector Minero)

	Beneficio en seco	Beneficio en húmedo	Explotación en el escudo continental	Minería marina profunda
Superficie terrestre	Devastación regional. Alteraciones morfológicas. Derrumbes en pie de monte; Destrucción de bienes culturales.	Devastación regional, alteraciones morfológicas y del curso de los ríos, formación de grandes arrumes de residuos.	Alteración morfológica del fondo del mar, erosión costera.	
Aire	Ruido, vibraciones por voladuras, nubes de polvo por tráfico, voladuras y erosión eólica, desechos gaseosos, nubes de voladuras; gases tóxicos; vibraciones	Ruido de motores, explotación, beneficio y transporte, desfoques.	Ruido, desfoques.	Ruido, desfoques.
Aguas superficiales	Alteraciones del equilibrio alimenticio; polución por agua negras contaminadas; polución debida a incrementos de erosión.	Denitrificación; exceso de aguas negras con cienos, polución y carga excesiva por aguas contaminadas.	Turbidez, gasto de oxígeno, exceso de aguas negras.	Turbidez, gasto de oxígeno, exceso de aguas negras.
Aguas freáticas	Descenso del nivel freático y del nivel de su calidad.	Alteraciones del equilibrio freático, alteraciones de la calidad de aguas freáticas.		
Suelo	Perdida de suelo en el área de explotación, baja de rendimiento, trampas secas, hundimientos, empantanamientos después de que resurja en el nivel freático; erosión del suelo.	Perdida de suelo en el área de explotación.	Alteraciones del piso marino, desmejoras del nivel de nutrientes del suelo.	Desmejoras del nivel de nutrientes del suelo.
Flora	Destrucción en el área de explotación, destrucción parcial y alteración de la flora en el área por cambios del nivel freático.	Destrucción en el área de explotación.		
Fauna	Desplazamiento de la fauna.	Desplazamiento de la fauna.	Destrucción de seres estacionarios marinos (bancos coralinos).	Destrucción de seres estacionarios marinos (bancos coralinos).
Humanos	Conflictos de usufructo de tierras, desarrollo de asentamientos inducidos, destrucción de áreas de recreación.	Conflictos de usufructos de tierras en periodos de bonanza, desarrollo de asentamientos inducidos.	Desmejora de la pesca.	Desmejora de la pesca.
Edificaciones	Daños por anegación después de resurgir el nivel freático.			
Otros	Posibles alteraciones de microclimas.	Posibles alteraciones de microclimas, incrementos de agentes patógenos en aguas estancadas.		

óptimas para la eliminación de los metales mediante procesos de precipitación; sin embargo, debido al alto contenido de hierro (férrico) y oxígeno disuelto, se hace necesario pretratar el agua para disminuir el contenido de estos elementos. El esquema básico del tratamiento a aplicar es el siguiente:

- Un pretratamiento en ambiente reductor para eliminar oxígeno del agua y reducir el hierro a su forma ferrosa, basado en procesos de reducción bacteriana del sulfato desarrollados en sustratos orgánicos.
- Un tratamiento para elevar el pH al agua y aportarle alcalinidad, basado en procesos de disolución de la caliza.
- Un postratamiento de oxidación/hidrólisis/precipitación para eliminar los metales.

La Tabla 9.11 muestra los criterios de dimensionado de las dos líneas de tratamiento que se emplea-

Tabla 9.11. Corrección de aguas ácidas en minas de carbón

Sistema de mantenimiento	Criterios de dimensionado	Fórmula de cálculo
SPSA (successive producing system alkalinity)	Tiempo de residencia mínimo en la caliza 14 h Espesor de la capa: 0,5-0,75 cm	Volumen (m^3) = caudal (l/h) · 14 h/Vol Poros (0,3-0,5)
	Contenido en acidez del agua de entrada Eliminación de acidez: 30-50 g/m^2/día	Superficie(m^2) = g acidez $día^{-1}$/30-50
Drenajes anóxicos calizos (DAC o ALD)	Tiempo de residencia mínimo en la caliza 14 h	Volumen (m3) = caudal(l/h) · 14 h/0,5
	Cantidad de caliza necesaria para 15 h de residencia y T años de vida.	M = (Qr_bt_R/VP) + (Q C T/X) M = masa de caliza (t) Q = caudal (m^3/h) r_b = densidad de la caliza (t/m^3) t_r = tiempo de retención (h) V_P = volumen de poros C = concentración de alcalinidad esperada en el efluente (t/m^3) T = diseño de vida (h) X = contenido de carbonato cálcico de la caliza
Balsas orgánicas	Tiempo de residencia mínimo de 14 h Volumen de poros 0,5	Volumen (m3) = caudal (l/h) · 14/0,5
	Contenido de acidez del agua de entrada Eliminación de acidez 3,5-7 g/m2/día	Superficie (m2) = g (acidez/día)/3,5-7
Ciénagas aerobias (Aerobic wetlands)	Contenido en hierro y manganeso del agua de entrada Para aguas alcalinas: Eliminación de hierro: 10-20 g/m^2/día Eliminación de manganeso: 0,5-1 g/m^2/día	Superficie (m^2) = (g de Fe/día)/10-20 g de Mn día/0,5-1

ron en este estudio para la corrección de aguas ácidas en las minas de carbón.

Las pruebas realizadas con este tipo de tratamiento con 2 líneas muestran que se puede mejorar sustancialmente las características del agua en cuanto a pH y metales disueltos, llegándose a alcanzar los estándares de vertidos que exige la Ley de Aguas Española.

4.3. TIPO DE PROCESOS EXTRACTIVOS. BENEFICIO DE MINERALES

Un proceso minero se puede definir como un conjunto de «operaciones unitarias» que modifican una materia prima para transformarla en un producto comercial o un insumo para otro proceso. A su vez, la operación unitaria es la etapa dentro de un proceso donde se realiza una modificación específica de, al menos, una corriente.

Todo proceso se alimenta de materias primas y energía para obtener un producto. En el transcurso del proceso se generan distintos tipos de residuos sólidos, líquidos y gaseosos que requieren un manejo adecuado para evitar impactos ambientales negativos, al igual que otros efectos no deseados como ruidos, vibraciones y olores.

Tanto la cuantificación como la caracterización de los residuos se pueden realizar a través de un análisis de los procesos desde los cuales se generan estos residuos. Este análisis sistemático busca, mediante balances de masa en régimen estacionario, establecer relaciones cualitativas y cuantitativas entre la alimentación a los procesos y los residuos generados.

La distribución de los distintos componentes, elementos y distintos flujos (corrientes) del proceso, necesaria para determinar los balances de masa, se pueden expresar en función de los parámetros de operación de cada una de las operaciones unitarias involucradas. Sin embargo, la distribución real debe ser determinada en forma empírica porque es muy difícil establecer las relaciones matemáticas que den cuenta de todos los fenómenos involucrados.

La Figura 9.40 muestra los principales componentes de un proceso minero, excluyendo la explotación de canteras o de materiales de construcción dado que normalmente no necesitan un proceso posterior, por lo que luego de ser extraído, normalmente, pasa a comercialización, lo que disminuye mucho la variedad de sus residuos y el tipo de tratamiento característico de un proceso minero.

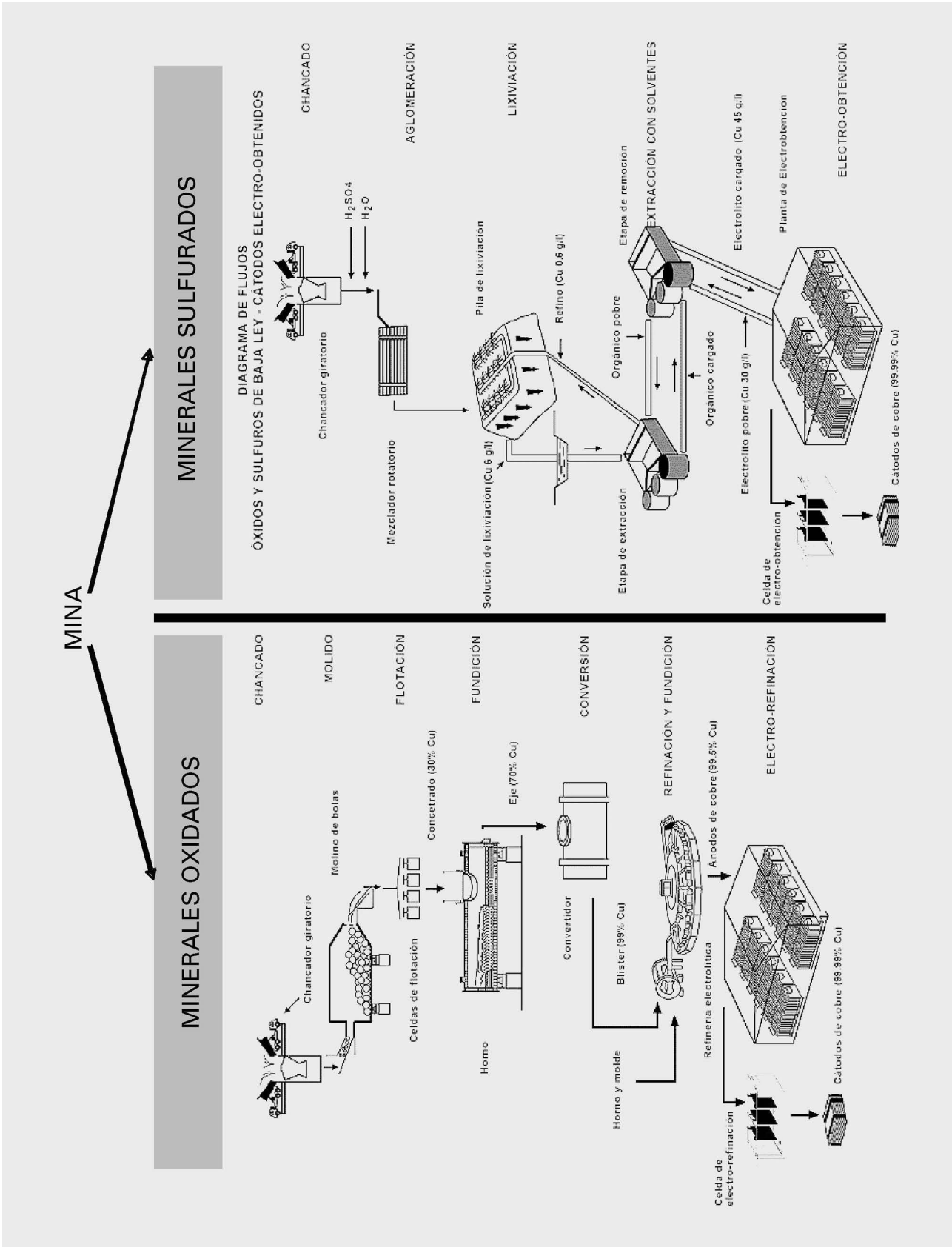


Figura 9.40. Diagrama de un proceso.

4.3.1. Explotación, procesamiento de minerales y metalurgia extractiva

La explotación de los recursos minerales, al igual que cualquier proceso, cuenta con diversas etapas de procesamiento para alcanzar el producto final (metal y/u otro compuesto comercial) a partir de la explotación del recurso mina. Las principales etapas que se identifican en el proceso minero son tres, las cuales se describen a continuación:

- Explotación.
- Procesamiento de minerales.
- Metalurgia extractiva.

a) *Explotación*

Esta etapa consiste básicamente en la extracción del mineral desde la mina por medio de la perforación y tronadura (voladura) de la roca, con el posterior carguío y transporte del mineral a través de camiones (en algunos casos el transporte se realiza a través de trenes o correas transportadoras).

Se pueden definir, básicamente, dos tipos de explotación:

- Superficiales o cielo abierto que, dependiendo de su forma de explotación, consiste en la remoción directa del mineral de interés separándolo del mineral que no posee interés económico (estéril).
- Explotación subterránea de minas, que se realiza por la profundidad del yacimiento, que hace inviable la extracción del mineral en relación a la extracción del estéril.

MÉTODOS SUPERFICIALES DE EXPLOTACIÓN

La minería de superficie corresponde a una de las dos formas básicas de explotación minera existentes. Esta actividad se lleva a cabo en la superficie del terreno, modificando, en distinto grado, las características físicas y químicas del entorno.

Los principales factores que influyen en la selección de la explotación de superficie son la morfología y la profundidad del yacimiento. Estas características deben ser tales que permitan una razón de remoción estéril-mineral económicamente rentable a lo largo de toda la vida útil del proyecto. Se debe tener en cuenta que, en la mayoría de las operaciones de superficie la cantidad de estéril que debe ser removido para recuperar una tonelada de mineral se incrementa con cada metro de profundidad.

En general, los yacimientos horizontales extensos, bajo recubrimientos de poco espesor, o que directamente afloran, son los más indicados para ser explotados de esta manera. Los estratos y filones de buzamiento muy fuerte, cuando son de gran potencia, pueden ser explotados ventajosamente por métodos superficiales. Grandes masas mineralizadas pueden

Figura 9.41. Vista de una mina a cielo abierto.

ser explotadas total o parcialmente por métodos de superficie, dependiendo, como se dijo anteriormente, de los espesores del recubrimiento (profundidad respecto a la superficie) y de las características morfológicas del yacimiento.

La explotación de superficie se caracteriza principalmente por los grandes volúmenes de material removido, lo cual determina el tamaño de la maquinaria a utilizar. En la mayoría de los casos, los equipos utilizados tales como camiones, palas, perforadoras, camiones aljibes, etc., son de mayor tamaño que en la minería subterránea. Lo mismo ocurre con las cantidades y dimensiones de los insumos utilizados en este tipo de faenas.

Debido a que cada yacimiento posee diferentes características, existen diversos métodos de explotación de superficie como:

a) Explotación de canteras.
b) Explotación por desmonte de capas.
c) Explotación aluvial.
d) Explotación a cielo abierto.

Métodos subterráneos de explotación

Existen numerosas técnicas de explotación subterránea. La experiencia ha ido desarrollando ciertos métodos de excavación de mineral, que han recibido denominaciones especiales derivadas de algunas de las características peculiares del método.

Durante las etapas de desarrollo y de preparación de una mina subterránea se han dejado las unidades de explotación en condiciones de ser excavadas. Cada unidad de explotación corresponde a un paralelepípedo, rodeado de labores mineras horizontales y/o verticales, que encierra un determinado volumen de mineral que será arrancado empleando algún método de explotación.

La excavación de la unidad de explotación, que puede efectuarse en forma ascendente (por realce) o en forma descendente (por rebaje), genera en el sector una cavidad de gran tamaño denominada caserón. Estos caserones, productos de la explotación, en muchos métodos se mantienen en pie, ya sea con o sin ayuda artificial, y en otros se derrumban fácilmente.

Dependiendo del comportamiento de estos caserones, durante la etapa de arranque del mineral, los métodos subterráneos de explotación se pueden clasificar en tres grandes grupos:

1. Métodos con caserones autosoportados

Se caracterizan porque los caserones quedan permanente vacíos una vez extraído el mineral sin requerir fortificación, o si la necesitan es mínima y muy puntual. Entre los métodos de explotación más conocidos de este tipo se pueden citar:

- Caserones y pilares.
- Explotación por subniveles.
- *Shrinkage* (contracción).

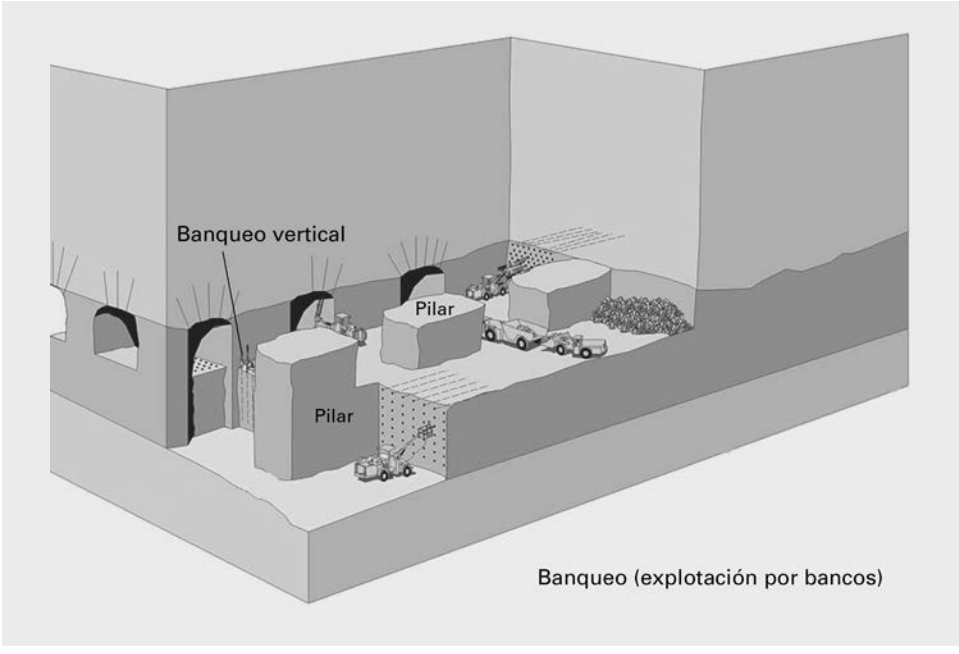


Figura 9.42. Método de caserones y pilares.

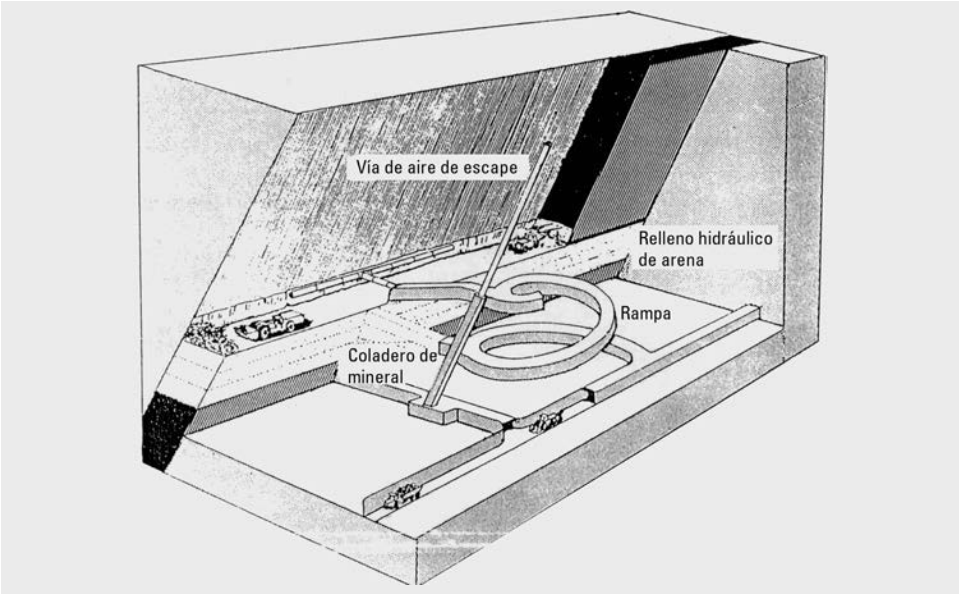


Figura 9.43. Método de corte y relleno (Cut&Fill).

2. Métodos con caserones soportados

Los caserones, en este caso, deben ser sostenidos con ayuda o fortificación artificial para mantenerse en pie. Los métodos más representativos son:

- Corte y relleno.
- *Square Set*.

3. Métodos de hundimiento

En estos métodos los caserones se van hundiendo gradualmente a medida que se va realizando la explotación. Entre los métodos de este tipo están:

- Hundimiento de bloques.
- Hundimiento por subniveles.

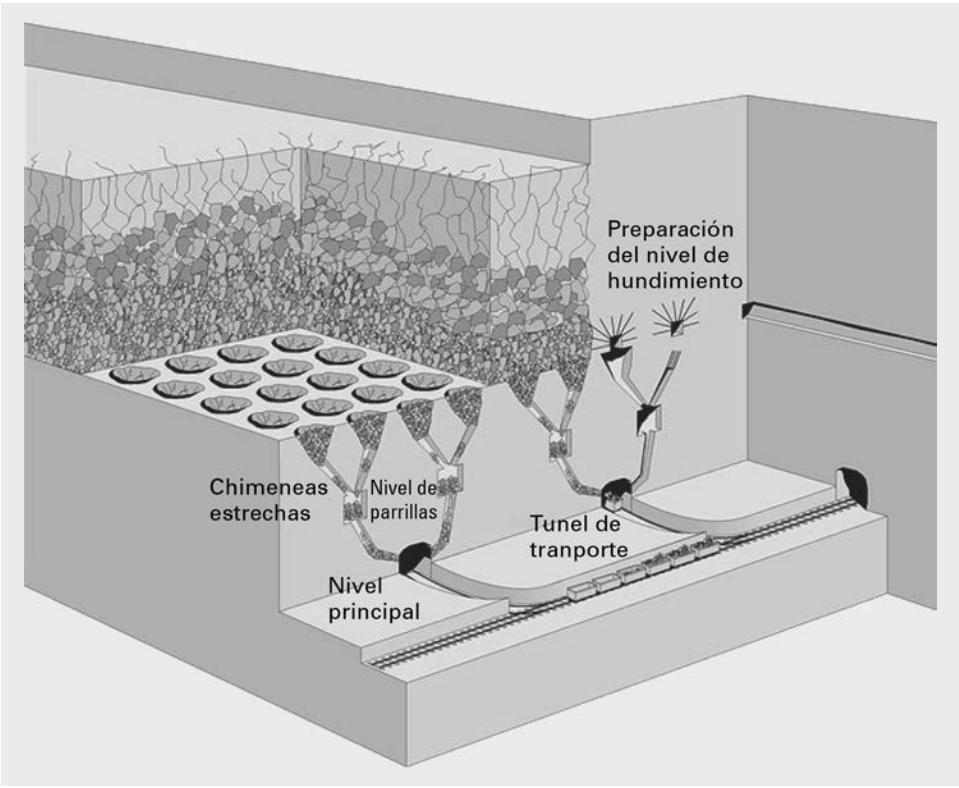


Figura 9.44. Método subterráneo de «block caving».

b) *Procesamiento de minerales*

Esta etapa también es llamada beneficio o concentración de minerales, y consiste en preparar el mineral para la extracción del metal valioso, en el caso de las menas metálicas, o producir un producto final comercial de los minerales industriales. Comprenden etapas de preparación mecánica de minerales (chancado y molienda), separación selectiva de las especies minerales presentes y separación sólido-líquido.

c) *Metalurgia extractiva*

Esta etapa puede describirse como el estudio conjunto de procesos químicos y operaciones físicas que, convenientemente elegidos entre diferentes variantes y en su secuencia, permiten que el metal pueda obtenerse en estado metálico o formando un compuesto con pureza y/o forma adecuada a su utilización posterior.

Cada una de estas etapas involucra operaciones unitarias que generan distintos tipos de residuos con características que dependen del tipo de recurso explotado.

Complementario a las tres etapas principales del proceso minero, se desarrollan otras actividades de apoyo que también generan residuos. Entre ellas se puede mencionar el mantenimiento de equipos, servicio de energía eléctrica, almacenamientos de insumos y transporte del producto final.

La Figura 9.45 presenta un diagrama general de las principales etapas en el proceso de explotación y principales residuos asociados a la explotación de recursos minerales, incluyendo solamente los residuos que caracterizan el proceso, dejando de lado los residuos considerados como universales, como bombillas, tubos fluorescentes y los comunes a la actividad: baterías, ropa de trabajo y equipos de seguridad, embalajes, gomas, correas transportadoras, chatarra, tambores de aceite, aceite usado, madera de embalaje, asimilables a urbanos, etc.

4.4. PRINCIPALES RESIDUOS MINEROS POR PROCESO

El mayor volumen de residuos sólidos generados en los procesos mineros está constituido por el lastre o material estéril extraído para tener acceso al mineral.

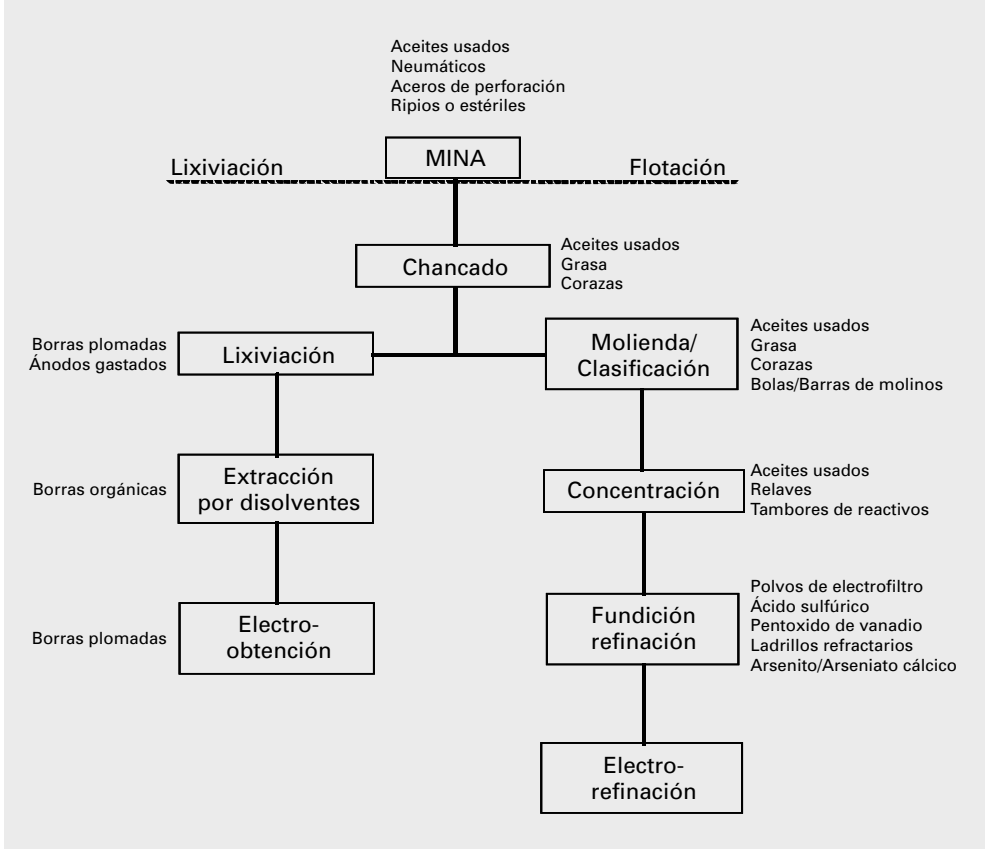


Figura 9.45. Diagrama de los principales residuos asociados a las explotación de recursos mineros.

Para ello es preciso remover una gran masa de rocas cuyo bajo contenido en metales de interés no permite un tratamiento económico. En el caso de la minería a rajo abierto, donde la razón entre lastre y mineral puede llegar a valores superiores a cuatro, tiende a aumentar la cantidad de lastre a medida que avanza la explotación. Este material debe ser descartado en forma definitiva o en algunos casos en forma provisoria hasta que cambios tecnológicos o variaciones en las condiciones de mercado vuelvan interesante su procesamiento.

En la minería subterránea, los volúmenes de material estéril extraído son bastantes menores. Sin embargo, se puede producir una fracturación del material sobreexpuesto a la zona de explotación. Este material estéril fracturado puede ser considerado como un residuo *in situ* y debido a la fracturación, que aumenta fuertemente la permeabilidad, se puede producir una meteorización que a su vez puede dar lugar en la generación de aguas ácidas.

Esta clase de residuos mineros se caracterizan entonces por su gran volumen, su ubicación en lugares generalmente cercanos al lugar de extracción, su relativa homogeneidad y en general por su baja toxicidad.

Por otra parte, los residuos metalúrgicos, producto de la transformación de los minerales para extraer el o los metales deseados, si bien representan cantidades menores, requieren, por sus características muy variables y por su contenido a veces elevado de compuestos y elementos potencialmente tóxicos, un manejo mucho más cuidadoso. Entre ellos se cuentan las escorias, los polvos de fundición y los residuos generados en la refinación.

Los relaves de flotación constituyen un tipo de residuo muy particular que si bien pueden ser considerados como residuos mineros al no presentar cambios químicos o mineralúrgicos con respecto al material inicialmente extraído, por su distribución granulométrica y, por presentarse generalmente como pulpa o lodo, requieren un manejo específico que los diferencia de todos los otros residuos generados.

En los procesos de lixiviación se generan ripios lixiviados impregnados de solución y otros residuos menores, como el *Crud* (borra) de aspecto gelatinoso generado en el proceso de extracción por disolvente. Su aparición se debe a la presencia de sílice coloidal u otras impurezas sólidas en las soluciones de lixiviación y se establece entre las fases orgánicas y acuosas. La cantidad de borra que se genera estará influenciada principalmente por las características de la sílice presente en mineral y las condiciones de arrastre por medio de la solución lixiviante.

4.4.1. Residuos generados en el proceso de extracción

En función de las características de los yacimientos, se hace necesario para su explotación remover grandes cantidades de material, el cual debe posteriormente ser reubicado en el entorno del yacimiento o planta de procesamiento. Los residuos sólidos que se generan en esta etapa del proceso son:

- *Estéril o lastre:* Se generan en grandes tonelajes. Incluyen aquellos materiales sin valor económico, que sólo han sido removidos del yacimiento y que, a lo más, han pasado por un proceso de trituración antes de su disposición. Estos residuos provienen de todos aquellos sectores del yacimiento cuyo contenido de mineral valioso es muy bajo para hacer atractiva su recuperación, pero que de todas maneras es necesario apartar para poder acceder a zonas más ricas del mismo. El estéril una vez removido del yacimiento se dispone formando las características «tortas» de estéril en las cercanías de los yacimientos mineros.
- *Minerales de baja ley:* El tonelaje de minerales de baja ley (mineral cuyo contenido de metal no hace rentable su procesamiento en la actualidad) varía de una faena a otra y son considerables las cantidades que se deben acopiar para su probable procesamiento en un futuro.
- *Desmontes de minas subterráneas:* En la construcción de galerías, piques y rampas para acceder al yacimiento subterráneo y durante la explotación de él se generan materiales estériles (comúnmente llamados marina) que deben ser dispuestos ya sea en el interior de la mina o en el exterior en forma similar a la minería a rajo abierto.

4.4.2. Residuos generados en el procesamiento de minerales

Según el tipo de proceso aplicado para la obtención del metal se pueden dar los siguientes tipos de residuos:

4.4.2.1. Residuos de flotación

En el proceso de flotación, concentración de los minerales de cobre y oro, se producen los residuos llamados relaves, o lodos.

Este tipo de residuo está compuesto por la suspensión fina de sólido (mezcla de 50% en peso de só-

lidos y 50% de agua), constituida fundamentalmente por el mismo material presente *in situ* en el yacimiento, al cual se le ha extraído la fracción con mineral valioso. Los relaves son conducidos en forma de pulpa hacia los depósitos llamados tranque de relaves (balsas de residuos), que están diseñados para permitir la decantación de los sólidos en suspensión y, dependiendo de la faena, se puede recircular la fase líquida (aguas sobre nadantes) al proceso o descartarla, ya sea a través de evaporación, evapotranspiración, descarte a cursos de agua o infiltración.

4.4.3. Residuos generados en el proceso de metalurgia extractiva

En el proceso de metalurgia extractiva, según el método que se aplique se pueden dar los siguientes tipos de residuos:

4.4.3.1. Residuos de lixiviación

En el proceso de lixiviación del mineral oxidado y sulfuros secundarios, se generan los residuos sólidos llamados «ripios».

En este proceso el mineral chancado, con un tamaño aproximado de un cuarto de pulgada, se dispone formando un pila a la cual se le hace pasar un fluido lixiviante durante un periodo de tiempo definido, (ácido sulfúrico en el caso de minerales de cobre y cianuro en el caso del oro), el cual solubiliza el metal de interés contenido en la pila. Una vez extraído el metal valioso, el mineral «agotado» que queda recibe el nombre de ripio de lixiviación o de cianuración. Los ripios pueden ser compactados y sobre ellos construirse una nueva pila o bien pueden ser removidos y dispuestos finalmente en otro sitio. Para el vertido de los ripios de lixiviación se utilizan normalmente sitios preparados e impermeabilizados, con el objeto de evitar el escurrimiento de soluciones generalmente ácidas.

4.4.3.2. Residuos de concentración

En los procesos de concentración a través de la extracción por disolventes se pueden generar los siguientes residuos:

- *Emulsión estabilizada:* residuos generados en el proceso extracción por disolventes en la interfase acuosa y orgánica. Estos sólidos generalmente se disponen en el vertedero de estériles, o se depositan sobre las pilas de ripios.

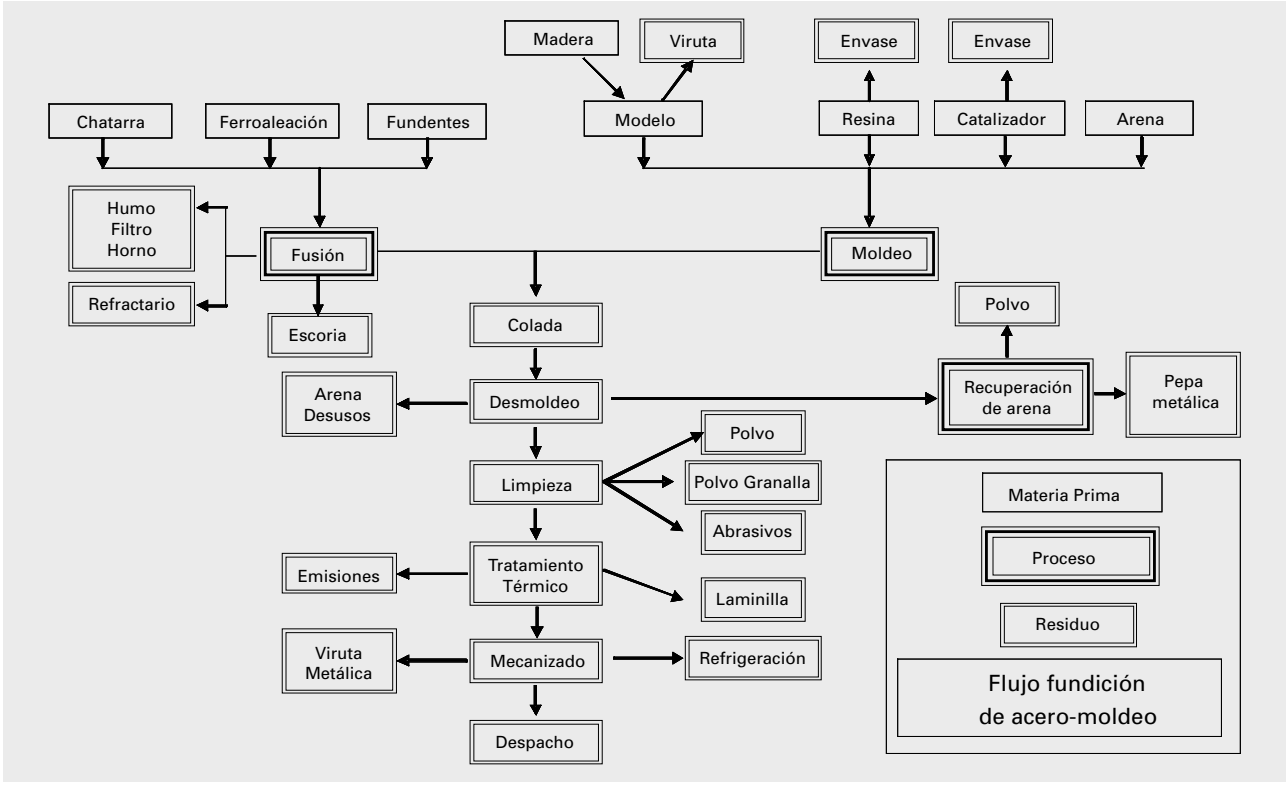


Figura 9.46. Diagrama de los principales procesos, insumos y residuos generados en una fundición de hierro.

- *Descarte de refino:* soluciones que se vuelven ricas en otros iones distintos a los de interés (cobre). En algunas faenas se utilizan piscinas de evaporación y los sólidos generados se disponen. En otras, se utiliza el sistema de pila-riñón para la purificación del refino, retornándose éste al proceso.

4.4.3.3. Residuos de electro-obtención

En los procesos de electro/obtención se pueden generar los siguientes residuos:

- *Borras de electro-obtención:* generadas en las faenas en las cuales se utilizan ánodos permanentes de plomo, donde se forman por la degradación de dichos ánodos. Generalmente el componente principal de la borra es plomo, el cual generalmente es reciclado por el proveedor de ánodos.
- *Lodos arseniacales:* son residuos que provienen del tratamiento de purificación del electrolito mediante un proceso de electro-deposición. Este barro contiene metales como cobre, arsénico, plomo, cadmio y bismuto, entre otros y dependiendo de los contenidos de éstos se disponen o se reprocesan antes de su disposición final.

4.4.3.4. Residuos de fundición (caso cobre)

En los procesos de fundición se pueden generar los siguientes residuos:

- *Escoria:* es el residuo producido durante la etapa de fundición de los concentrados de cobre. Las escorias principalmente fijan el hierro y otros metales presentes en el concentrado, mediante la generación de compuestos estables, más o menos vitrificados, con la sílice que se utiliza como fundente. Las escorias son retiradas desde los hornos y son dispuestas en vertederos.
- *Borras:* antes de ingresar a la planta de ácido, los gases pasan por torres de lavado (*scrubber*) y precipitadores húmedos, donde se separan de la corriente gaseosa las sustancias volátiles y gaseosas, pasando al agua de lavado como sales o sustancias ácidas, llamadas «borras». De esta forma, a la planta de ácido ingresa solamente el dióxido de azufre. Los efluentes líquidos de la planta de ácido (borras) se tratan en una planta para neutralizar y precipitar el arsénico como arsenito de calcio, residuo sólido que se dispone en un vertedero especialmente construido para estos efectos.
- *Residuos de carbón y escorias de fundición:* residuos generados en la minería de oro en el caso de que se continúe al proceso de lixiviación con precipitación por zinc o adsorción con carbón activo. Generalmente van a almacenamiento para ser comercializadas posteriormente.

4.4.4. Residuos industriales de la minería

En la actividad minera, a parte de los residuos identificados anteriormente, se dan otros tipos de residuos que no se asocian específicamente a un proceso determinado, más bien están presentes en muchas faenas industriales y en volúmenes distintos dependiendo del tipo de actividad u operación unitaria de que se trate. A continuación se presenta un listado de estos tipos de residuos industriales:

a) *Residuos por tipo de material*

- Aceros: de perforación, desgaste de equipos, inoxidable y revestimiento de chancado y molienda.
- Aislantes.
- Maderas.
- Plásticos: cañerías, membranas.
- Láminas de goma.
- Vidrios.
- Chatarra ferrosa.
- Chatarra no ferrosa.
- Ladrillos refractarios.

Estos residuos, generalmente, no son considerados peligrosos.

b) *Envases y embalajes*

- Contenedores: contenedores plásticos con un tamaño de 1 m^3.
- Tambores: tambores metálicos y plásticos de distintos tamaños.
- Embalajes de madera.
- Sacos y big-bags.
- Envases spray.
- Papeles y cartones.

Los envases y embalajes, por lo general, son considerados no peligrosos, con excepción de los envases spray.

c) *Lubricantes y reactivos químicos*

- Ácidos usados.
- Bases usadas.
- Insumos y reactivos vencidos.
- Refrigerantes.
- Líquidos anticongelantes.
- Lubricantes: aceites y grasas usadas.

Los lubricantes y reactivos químicos, generalmente, son considerados residuos peligrosos.

d) *Repuestos, piezas y partes*

- Artefactos dados de baja.
- Baterías (vehículos livianos y pesados).
- Correas transportadoras.
- Polines.
- Filtros industriales.
- Luminarias.
- Tubos fluorescentes.
- Repuestos de vehículos.
- Neumáticos (vehículos livianos y pesados).
- Asbesto.

Algunos de estos residuos son considerados peligrosos, mientras que otros no lo son.

e) *Residuos de limpieza*

- Absorbentes.
- Detergentes.
- Solvente usado.
- Trapos y guaipes.

Estos residuos de limpieza son considerados peligrosos.

f) *Residuos provenientes de derrames*

- Tierra contaminada.

Dependiente del tipo de contaminación, se considera residuo peligroso o no.

4.5. IDENTIFICACIÓN DE PRINCIPALES RESIDUOS PELIGROSOS, POSIBILIDADES DE REEMPLAZO, MINIMIZACIÓN Y/O VALORIZACIÓN

En el manejo de los residuos se aplica una jerarquización, considerando la prevención y la reducción de ellos antes que su tratamiento y disposición final. En orden de preferencia, las opciones para el manejo de los residuos son las siguientes:

- *Evitar:* prácticas que evitan la generación de residuos.
- *Valorización:* reducir, reutilizar y reciclar. Reuso de materiales o energía. Incluye reciclaje, vitrificación e incineración con recuperación de energía. Se pueden reutilizar y reciclar residuos como envases metálicos, vidrio, papel, disolventes, aceites y agua de proceso. La valorización y reciclaje es más efectivo si los residuos son separados lo más posible, ya que significa que hay menos contaminantes a eliminar antes de su reuso o reciclaje. A través de bolsas de residuos se puede promover que un residuo generado por una empresa sea utilizado por otro.
- *Tratamiento:* disminuir cantidad o peligrosidad de residuos, por ejemplo incineración sin recuperación de energía. Debería solo utilizarse si la factibilidad de las alternativas de reutilización y reciclaje ha sido evaluada. El tratamiento puede resultar en una reducción de toxicidad o movilidad de contaminantes, o la extracción de un subproducto potencialmente valioso, generando así mayores alternativas para su disposición final. En el caso de los residuos mineros, la opción se reduce a los residuos orgánicos: plásticos, aceites, neumáticos, etc.
- *Disposición final:* en instalaciones autorizadas, o sea vertederos para uso mixto (industrial y RSU) o rellenos de seguridad para residuos peligrosos. Para los residuos inertes mineros una opción son los antiguos pozos de extracción de áridos para así recuperar estos terrenos y aumentar la vida útil de los rellenos sanitarios.

En el DVD adjunto, en el punto 1, se muestra información sobre tecnologías limpias de la minería del carbón.

4.5.1. Residuos masivos mineros

En el caso de los estériles o lastre, que son los residuos de descarte generados en los procesos de extracción, éstos están constituidos básicamente por las mismas materias aprovechadas en los procesos mineros, y las prácticas actuales de manejo y disposición final no alteran significativamente su entorno al ser dispuestas en las cercanías de los lugares de obtención. En el caso de los relaves, escorias y ripios, que son residuos generados en procesos de be-

neficio, tienen algunas opciones de valorización, como son:

- *Reutilización:* Estos residuos se consideran, en algunos casos, como reservas de minerales, para un uso futuro.
- *Recuperación y Reciclaje:* Las escorias tienen concentraciones de cobre que eventualmente podrían ser recuperadas y recicladas.
- Materias primas para otros procesos.

4.5.2. Residuos industriales mineros

Aparte de los residuos sólidos masivos, se producen otros residuos mineros en los procesos de obtención, como los de captación de emisiones al aire, barros arseniacales, borras plomadas, residuos del proceso de extracción por disolventes y otros. Sobre estos tipos de residuos existen algunas prácticas de valorización, tales como:

- *Recuperación:* De los barros arseniacales se recuperan los metales provenientes del tratamiento de purificación del electrolito (proceso de electrodeposición), como son: cobre, arsénico, plomo, cadmio y bismuto, entre otros. Otro tipo de residuo con posibilidades de recuperación es el obtenido en la captación de emisiones producida durante las etapas de fusión y conversión. Estos residuos que contienen cobre, arsénico y plomo, entre otros, se captan en una etapa de depuración seca (filtros de mangas, cámaras de decantación y/o precipitadotes electrostáticos) antes de que el gas sea tratado en una planta de ácido sulfúrico.
- *Reciclaje:* De las borras plomadas, se recupera el plomo generado por la degradación de los ánodos de plomo en el proceso de electro/obtención, que es reciclado por el proveedor de ánodos.

Otros residuos generados en la actividad minera los constituyen los residuos peligrosos, como los aceites minerales usados, tambores contaminados, envases y embalajes de materias primas e insumos peligrosos, disolventes orgánicos, baterías, guaipes contaminados con aceite, filtros, plásticos (tuberías, depósitos) contaminadas, barras de hierro, correas transportadoras, maderas contaminadas, entre otros. Sobre estos tipos de residuos existen algunas prácticas de valorización, tales como:

- *Reutilización:* Los aceites quemados se reutilizan en otros procesos de la misma actividad minera y/o se comercializa con otras actividades productivas que posean la respectiva autorización sanitaria para ello. Las correas transportadoras se entregan para su uso en sistemas de riego, canales y canaletas. Las barras de hierro se reutilizan dentro de los procesos mineros. Los tambores de materias primas e insumos se devuelven al proveedor o se limpian para ser reutilizados como contenedores de residuos.
- *Recuperación:* Las chatarras se comercializan para recuperar los metales contenidos en ellos.

4.5.3. Utilización de aceite usado de los dumpers

Normalmente los aceites procedentes de actividades mineras, tienen su mayor utilización como insumos en los mecanismos de conminución y transporte. Es en este punto donde se empieza a notar algunas características específicas de los métodos de explotación utilizados y el volumen de producción que será proporcional a la generación de aceites.

Dadas las actuales tendencias al gigantismo en el mundo minero los equipos tienen cada vez mayor dimensión y, en justa correspondencia, los aceites generados representan cantidades muy elevadas. También los neumáticos, de hasta 5 m de diámetro 1 m de anchura y 2 toneladas de peso, constituyen un problema específico de esta actividad.

La Figura 9.47 muestra un equipo minero para minería de rajo abierto en el cual se pueden apreciar las dimensiones de un dumper. Ello puede dar una idea de los consumos en aceite, combustible y neumáticos.

Una práctica de valorización consiste en la adición de aceites usados en la fabricación de explosivos de tronadura, como los ANFOS, compuestos normalmente por nitrato de amonio al 94% y petróleo (Diesel) al 6% o ANFOS pesados (ANFO y emulsiones), en el cual el diesel puede ser reemplazado parcialmente por aceite hasta en un 50%. Dicha práctica permite una solución en terreno de los aceites contaminados, en la actualidad esta es una práctica que cada día crece en el mercado minero.

4.6. CHATARRAS: ¿NUEVOS RECURSOS?

En el año 2006 se ha registrado un importante aumento en el consumo mundial del acero, saltando de las 1.029 millones de toneladas a 1.121 millones de toneladas, lo que representa un crecimiento del

Figura 9.47. Camión (dumper) minero utilizado en minería de superficie.

9% anual según los datos del Instituto Internacional del Hierro y Acero (IISI por su sigla en inglés). La China y la India son los países que han registrado un mayor crecimiento en su consumo anual (10% y 14,4%, respectivamente) y dominan el mercado mundial del acero. Las proyecciones del IISI apuntan a que el crecimiento mundial en el consumo de acero rondará el 4,2% anual, así mismo predice crecimientos de consumo para China e India del orden de 6,2% y 7,7%, respectivamente, convirtiendo a la India en el país con mayor crecimiento en consumo de acero a nivel mundial.

Buena parte de la presión a crecimiento del consumo de acero en la India proviene de la industria de transporte marítimo, que se calcula debe invertir al menos 3.500 millones de euros para renovar el 56% de su flota. El promedio de edad de los barcos en la flota hindú es de 18 años y un 40% de los barcos sobrepasan los 20 años, este dato cobra importancia si se considera que, a nivel internacional, se recomienda y en algunos países se exige que a los 17 años como máximo un barco de transporte debe ser completamente reacondicionado y el casco renovado para mantenerse en servicio. Otro agravante de la industria de transporte marítimo de la India es que la mayor parte de sus barcos es de un solo casco por lo que no podrán navegar a partir del año 2010 como lo establece el convenio entre la India y la Organización Marítima Internacional.

Para satisfacer la demanda internacional de materias primas y acero, teniendo en cuenta que el crecimiento en producción y consumo implica que los mayores productores son a la vez los principales consumidores dejando parte de la demanda internacional insatisfecha, se recurre al mercado de las chatarras de metales férricos y no férricos para equilibrar la balanza entre países. En este escenario Turquía juega un papel muy importante al haberse consolidado el año 2006 como el principal país comprador de chatarra proveniente principalmente de China, provocando una disminución del flujo hacia los países europeos; adicionalmente, China por el incremento en su demanda interna está actualmente disminuyendo gradualmente sus envíos y vende chatarra casi únicamente bajo pedido.

El precio internacional de los metales necesarios para la fabricación del acero inoxidable no ha parado de subir desde el año 2000, como es el caso del níquel y el hierro, lo que provoca que los precios actuales sean prácticamente el doble de los que se pagaba por tonelada en el 2004. Este panorama implica que en el futuro inmediato el comercio internacional de chatarra de acero mostrará un incremento en precios y volúmenes encareciendo significativamente el uso de acero en los sectores de construcción, astilleros y transporte.

En el año 2005 Australia y Brasil se consolidaron, como muestra la Tabla 9.12, en los principales suministradores de mineral de hierro para la producción de acero.

Tabla 9.12. Principales países productores de mineral de hierro (Fuente IISI).

País	Producción t · 10^6
Australia	239,0
Brasil	223,4
India	80,9
Canadá	27,9
Sudáfrica	27,4
Rusia	20,1
Ucrania	19,6
Suecia	17,8
EE UU	11,8
Mauritania	10,6
TOTAL MUNDO	716,7

El incremento mundial en la producción de mineral de hierro ha sido del 11,3% en el año 2004/2005, ello ha supuesto un lógico incremento de los precios del mineral. Por otro lado, este mercado también se ha visto distorsionado por la demanda de chatarra de acero. En este mismo periodo, la China ha incrementado un 18,4% sus importaciones y la India un 14,1%. En octubre de 2006, el precio medio de la chatarra metálica en Alemania estaba en 221 €/t.

4.6.1. Otros metales

El precio del níquel, en octubre de 2006, estaba en 27.000 €/t. El incremento incesante de la producción de acero inoxidable provocará la elevación del precio del metal y de la chatarra de níquel, que para el inoxidable 304, era de 2.200 €/t en 2006.

En similar situación, con algunas particularidades, se hallan otras chatarras metálicas como:

- Aluminio, con una demanda sostenida pero estable.
- Cobre, mostró en 2005 y 2006 estabilidad.
- Plomo, cuyo mercado de metal secundario se ha incrementado.
- Zinc. La demanda, al menos en Europa, se ha incrementado.

5. Valorización de escorias

Como elemento de descarte la mayoría de las escorias se asemejan con propiedades de un vitrificado por lo que normalmente son vítreas y por tanto inertes, de donde se colige que su gestión debe estar orientada a recuperar el porcentaje de mineral de valor presente en ellas, que usualmente es inferior al 1%, lo que no soluciona el problema de gestión de residuos y dada su naturaleza vítrea, además, hace difícil la recuperación de los minerales contenidos.

Destinos comunes en la valorización de las escorias vítreas son su uso como material para arenado (áridos para proyectar), grava como material de construcción o para subbase de firmes. En esta última aplicación es de destacar su alto peso específico, lo que confiere a los caminos mayor estabilidad y durabilidad.

Dependiendo del proceso y de la materia prima cada tipo de escoria tendría diferentes composiciones con un elevado contenido de hierro. Las escorias habitualmente tendrán aplicaciones o posibilidades de recuperación, no solamente en su valorización como material de construcción, sino también opciones de recuperación energética.

5.1. VALORIZACIÓN ENERGÉTICA POR MEDIO DE LA RECUPERACIÓN DEL CALOR SENSIBLE DE ESCORIAS DE FUNDICIÓN

Este tipo de valorización no es una característica de las escorias, sino del proceso del cual provienen que dada su condición de fluido retienen gran cantidad de calor que puede ser recuperado para procesos de secado y/o precalentamiento de gases de entrada, lo que optimiza un proceso.

5.1.1. Descripción del proceso de recuperación de calor

La escoria de limpieza se produce en los hornos rotatorios intermitentes que trabajan a temperaturas próximas a los 1.250 ℃. Cuando, debido a la temperatura, la viscosidad ha descendido suficientemente aquella se puede verter. De esta manera sale un chorro de líquido incandescente a alta temperatura que presenta posibilidades de recuperar el calor sensible almacenado. En referencia a la Figura 9.48, el proceso parte con la recepción del fluido de esco-

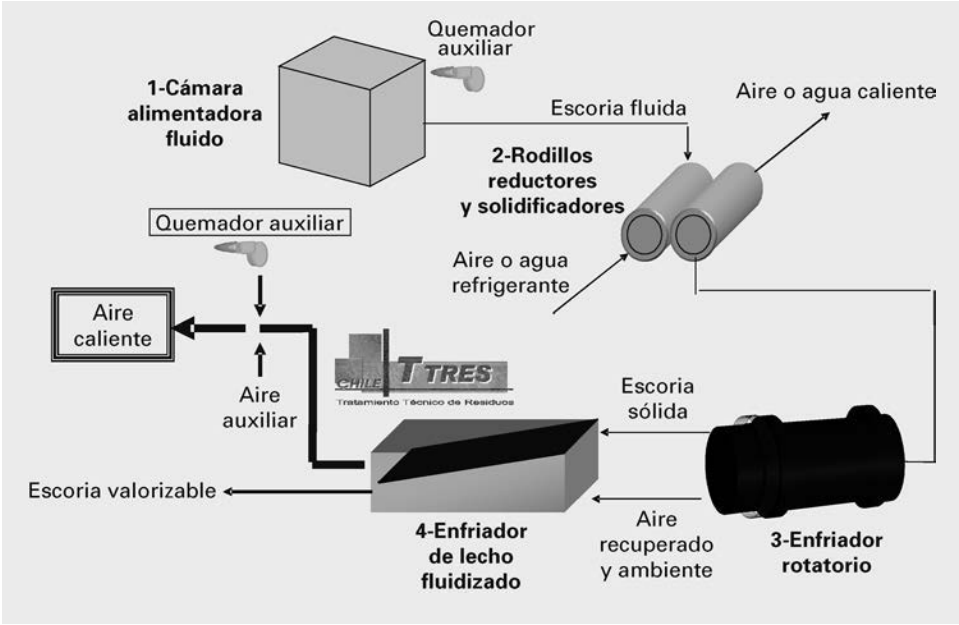


Figura 9.48. Diagrama de funcionamiento del sistema de recuperación de escorias de fundición (Ttres Chile).

ria que es almacenado en una cámara alimentadora de fluido, que tiene como objetivo principal convertir el vertido discontinuo en uno continuo y regular. Esta cámara, constituida en su interior por material refractario y aislante, debe mantener su contenido en estado líquido. Como medida precautoria la cámara ha de disponer de quemadores auxiliares que se pondrán en funcionamiento en caso de existir peligro de una solidificación de una parte de la escoria fundida.

La etapa siguiente consiste en hacer pasar la escoria entre dos rodillos paralelos que se encuentran enfriados por un flujo de agua que circula por el interior de ellos a una temperatura y caudal suficiente para que la escoria líquida, que pasa por el espacio que separa ambos rodillos, al entrar en contacto con la superficie fría, se moldee y solidifique superficialmente (una pequeña parte es triturada, ya que el sistema está diseñado para disminuir el tamaño por contracción y fractura de la escoria). La disparidad de temperaturas entre la escoria y la superficie de los rodillos provocan su contracción y fractura. La geometría resultante es una superficie delgada, con un área extensa para facilitar su enfriamiento por aire. Es decir, la sección circular de la escoria fundida a la salida del horno es constreñida al pasar entre los rodillos a una lámina en contacto con una superficie fría. El choque térmico y la contracción asociada provocan la rotura de la lámina en escamas (granalla).

La siguiente fase contiene un enfriador rotatorio al que se le inyecta aire en el sentido de la alimentación de escoria. Este tromel gira permanentemente, y gracias a una pendiente en su interior, permite el avance de la escoria, la cual sale por un lado a menor temperatura, junto al aire caliente. Esta etapa tiene dos objetivos: soportar altas temperaturas (la escama solo está fría en la superficie y el calor remanente en el núcleo vuelve a calentarla) y recuperar parte del calor.

La cuarta etapa y final, contiene un enfriador de lecho fluidizado donde se inyecta aire para lograr la recuperación de calor residual en la escoria. El caudal de aire a favor de la pendiente del lecho del enfriador colabora con el avance de la escoria fragmentada hasta su salida.

La energía recuperada en forma de aire caliente se envía al secado de concentrados. Las ventajas del sistema son las siguientes:

- Reducción de costos en procesos de secado u otro proceso por el uso final del calor.
- Uso racional de los recursos naturales.
- Reducción del uso de combustibles fósiles.
- Reducción de la emisión de gases.
- Proceso que no interrumpe, no retrasa, ni se opone al proceso industrial.
- Granallado del 100% de la escoria procesada aumentando la posibilidad de comercialización y sus diferentes aplicaciones (arenado, subbase de caminos, fabricación de cemento, etc.).
- El proceso es complementario a una posible recuperación metalúrgica.

5.1.2. Valorización de escorias en la fabricación de cemento

Este tipo de valorización consiste en agregar las escorias como materia prima de cemento, o sea, aprovechar las condiciones de fabricación en el horno de clínquer aportando las escorias como parte de los materiales utilizados normalmente para la fabricación del cemento.

El cemento es un material que une los fragmentos detríticos (arenas o gravas) de ciertas rocas clásticas (areniscas o conglomerados). En general, la cohesión de estas rocas tiene su origen en la precipitación química, siendo las sustancias cementantes mas frecuentes la sílice, los carbonatos, la alúmina y los óxidos de hierro, tal y como muestra la Tabla 9.13.

Tabla 9.13. Composición química del cemento puzolánico.

Cal	58,2 a 65,8%
Sílice	19,8 a 26,4%
Alúmina	4,2 a 9,5%
Óxido de hierro	2,2 a 4,5%
Óxido de magnesio	de ppm a 2,9%
Anhídrido sulfúrico	0,2 a 2,2%
Álcali	0,2 a 2,8%
Residuos insolubles	0,1 a 1,4%

Dichos materiales normalmente se encuentran en la composición de ciertas escorias como son las de hierro que tienen distintos tipo de residuos valorizables y dependiendo de los procesos existentes se pueden valorizar como aportes a la fabricación.

Hay que tener en cuenta que como práctica normal en muchas fundiciones se utiliza caliza o sílice como fundentes, que se suman a los altos contenidos de hierro presente, como muestra la Tabla 9.14, en las escorias después de las correspondientes separaciones por pesos específico llevadas a cabo en las fundiciones.

Otro tipo de residuos valorizables, en la fabricación de clínquer, son los polvos de granalla, que consisten en óxidos que se desprenden de la superficie de las piezas finales que caen por diferencias de coeficientes de dilatación. Al ser óxidos mezclados con sílice los hacen muy atractivos para su valorización en la fabricación de cemento.

Tabla 9.14. Composición promedio de escorias de fundición de cobre, Chile

Composición promedio de escorias de descarte de fundición de cobre	
Cu	0,8%
Fe_3O_4	5,4%
As	0,0%
Sb	0,0%
Fe	45,0%
S	0,5%
SiO_2	30,0%
Al_2O_3	4,0%
CaO	1,0%
MgO	0,8%
Total	87,5%

5.1.3. Valorización de escorias en la fabricación de cerámica

Las escorias después de enfriadas constituyen, potencialmente, una materia prima para la industria cerámica llegando a constituir materiales parcialmente recristalizados y alcanzando elevadas resistencias mecánicas.

Hay que recalcar que el interés de las escorias es por sus elementos constituyentes principales por lo que cualquier proceso de recuperación anterior de metales no es incompatible con este tipo de valorización.

Este apartado se verá en mayor profundidad en el capítulo de valorización de polvos de fundición dado que presentan otras propiedades importantes para la estabilización de metales tóxicos en su red molecular quedando integrados en la matriz, sin posibilidad de lixiviar.

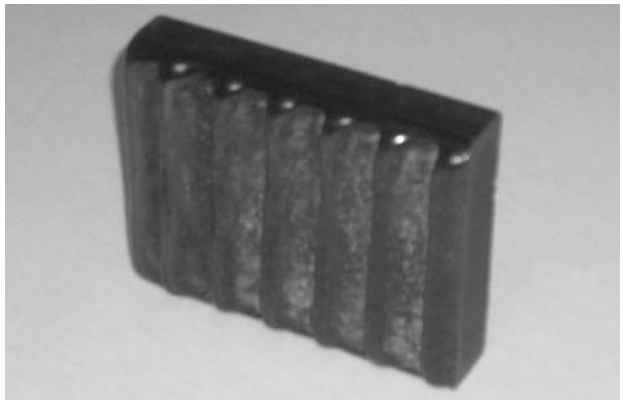


Figura 9.49. Baldosa para alto tráfico para plazas, paseos o estaciones fabricada a partir de escorias de fundición.

6. Procesos de beneficio de minerales y sus principales residuos

Los procesos de beneficio de minerales son los más proclives por los impactos ambientales de sus emisiones, transformaciones químicas, consumo de energía, riesgo de generación de residuos sólidos y líquidos que se ven aumentados tras la captación de contaminantes en los sistemas de filtración, que arroja la mayor parte de residuos peligrosos.

La Figura 9.50 muestra las dos líneas tradicionales de beneficio de cobre.

Se diferencian dos métodos de beneficios de minerales, dejando atrás a los medios de concentración que como su nombre indica, dentro de los procesos mineros sirven para aumentar el porcentaje de la especie mineralógica de interés sin transformación química.

En la Tabla 9.15 se pueden observar los diferentes métodos de procesamiento de minerales que irán variando dependiendo de los minerales a tratar. A continuación se hace una breve referencia a dichos procesos.

6.1. VÍA HÚMEDA O HIDROMETALURGIA

Los minerales oxidados normalmente no se pueden concentrar eficientemente por flotación, concentración gravitacional o magnética; por tanto se tratan

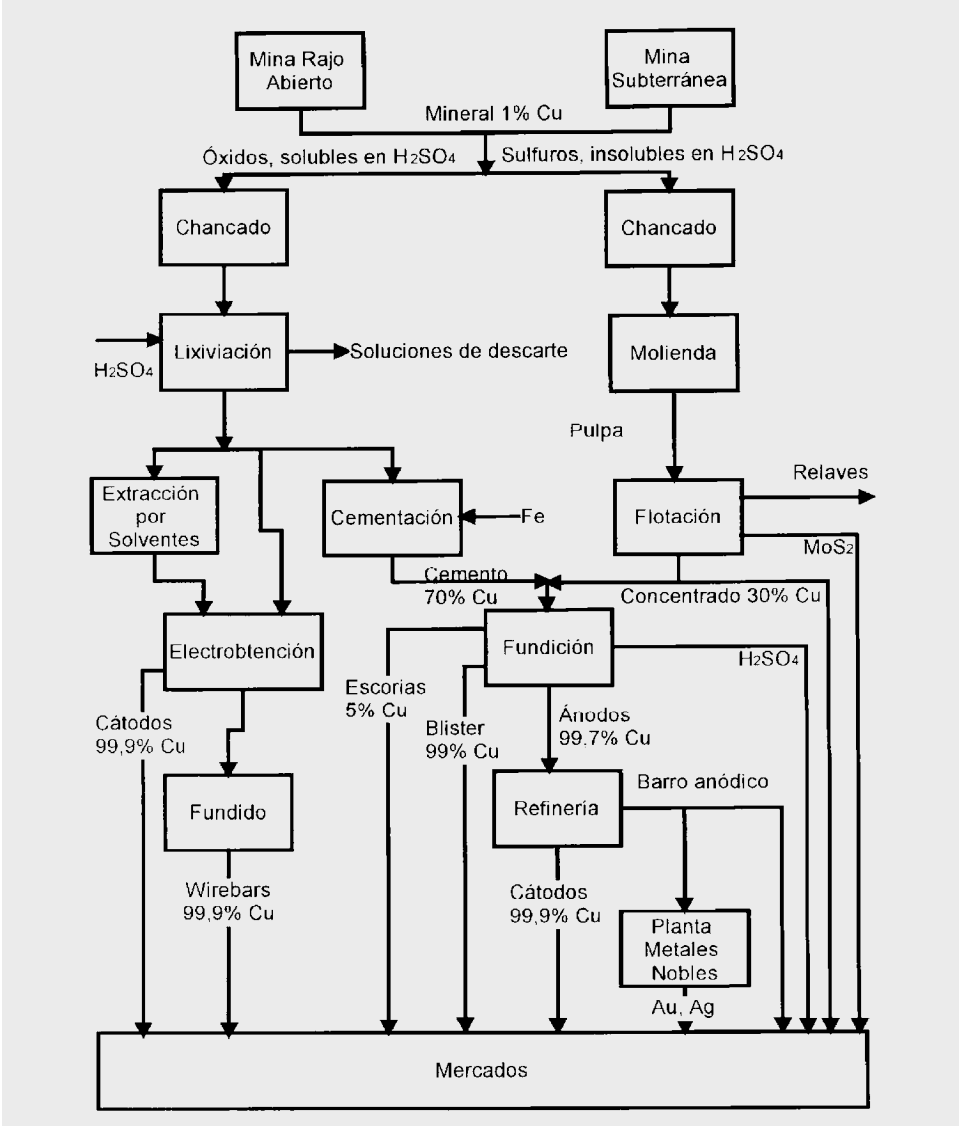


Figura 9.50. Diagrama de proceso de un mineral de cobre con diferentes métodos de beneficio de minerales (fuente B. Mihovilovic y P. Kilt. Uso de la descomposición térmica para beneficio de los minerales sulfurados de cobre chilenos, sin contaminación de azufre).

Tabla 9.15. Diferentes tipos de beneficio de minerales

Vía seca o pirometalurgia	Vía húmeda o hidrometalurgia
Calcinación	**Lixiviación**
Oxidante	Ácida
Sulfatante	Básica
Clorurante	Neutra
Aglomerante	**Purificación y/o concentración**
Otras	Métodos químicos convencionales
Fusión	Cementación
Reductora	Resinas de intercambio de ion
Ultrareductora	Extracción con disolventes
Neutra	**Precipitación**
Oxidante	Electrólisis
Volatilización	Cementación
Reductora	Métodos Químicos
Oxidante	
De haluros	
De carbonilos	

por técnicas hidrometalúrgicas, es decir por cementación, lixiviación (LX) seguida de precipitación o electrólisis, o nuevamente la cementación de la especie de interés. Recientemente, ésta parece ser la mejor solución.

Los minerales a lixiviar son preparados mecánicamente con el fin de aumentar la superficie de exposición, con una reducción de tamaño que permita un contacto íntimo entre la solución y la superficie del mineral. Para lograr esta operación de forma eficiente, primeramente se realiza un etapa de aglomeración en la cual se consigue la adhesión de partículas finas a las más gruesas, permitiendo una distribución uniforme de tamaño en la alimentación a pilas de lixiviación, evitando además la migración de estas partículas con el flujo lixiviante.

Los métodos de lixiviación que se utilizan en la extracción hidrometalúrgica son:

- Lixiviación *in situ*.
- Lixiviación en vertedero.
- Lixiviación en bateas.
- Lixiviación por agitación.
- Lixiviación en pilas.

La lixiviación in situ es aquella donde el mineral de interés es extraído desde la matriz rocosa que lo contiene a través de una solución específicamente preparada que percola en el lecho mineral capturando la especie útil.

Lixiviación en vertederos, son aquellos depósitos que se encuentran relativamente controlados, con un contenido bajo de mineral de interés. Es decir, a partir de material removido de una mina de baja ley. Por lo general este tipo de lixiviación es asociada a métodos de explotación a cielo abierto, por lo que esta práctica literalmente significa la recuperación de metal a partir de material considerado residuo.

La lixiviación en bateas consiste en la lixiviación de mineral utilizando un medio confinante, es decir, se puede saturar con mayor cantidad de solución lixiviante dicho mineral. Este tipo de lixiviación es utilizada con preferencia en minerales de baja ley y gran valor comercial como el oro o la plata, pero también es utilizada en procesos de cobre.

La lixiviación por agitación es realizada en reactores cerrados o autoclaves en los que se puede controlar la presión interior del reactor y la temperatura de reacción. Normalmente es aplicada a minerales de gran valor comercial cuya extracción por los métodos convencionales es complicada operacionalmente o encarece el valor del negocio minero.

Lixiviación en pilas (LX). Es un proceso que consiste en la construcción de unos montones perfectamente definidos y controlados de un mineral, con una granulometría que asegure una recuperación óptima, considerando además un sellado de las bases con el fin de evitar las pérdidas por percolación.

La preparación de este tipo de lixiviación requiere considerar una serie de factores: la superficie dispuesta para formar la pila, sellar con capas impermeables la superficie de la base para evitar pérdidas por percolación, dimensiones de la pila, talud o ángulo de inclinación.

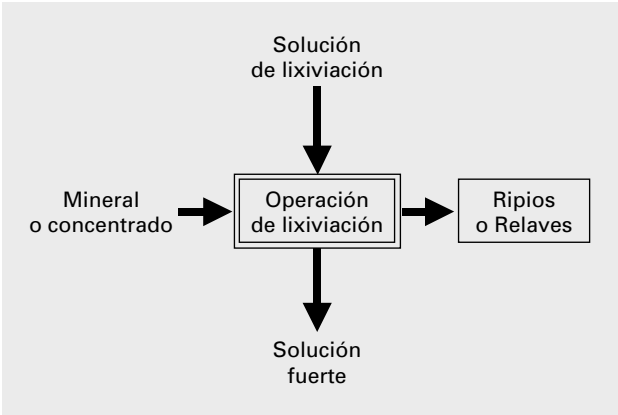


Figura 9.51. Diagrama del proceso de lixiviación y su residuo característico.

En general este proceso tiene como principal residuo característico los minerales ya tratados o desmontes de lixiviación, cuyo volumen dependerá de la capacidad productiva de la mina y de la ley del mineral, quedando la diferencia como residuos.

6.1.1. Extracción por disolvente (caso del cobre)

La solución procedente de las pilas de lixiviación, es liberada de muchas impurezas y se concentra su contenido mediante una extracción iónica.

La extracción por disolventes es un proceso fisicoquímico de separación y concentración, en el cual las especies solubles que están en una cierta fase líquida se distribuyen preferencial y selectivamente en una segunda fase, también líquida, siendo ambas fases completamente inmiscibles entre sí, es decir, que por un medio de un líquido selectivo son transportados a otro medio líquido teniendo lugar una concentración y/o purificación. Este proceso consta de dos etapas:

- *Extracción:* etapa en la que la fase portadora del metal de interés entra en contacto con la fase orgánica selectiva.
- *Reextracción:* o recuperación de la especie metálica de la fase orgánica cargada.

La Figura 9.52 esquematiza el funcionamiento de un sistema de extracción por disolventes.

El residuo característico de este proceso es la borra contaminada con diferentes elementos que se han depositado en ella. Este tipo de residuo normalmente tiene características de peligroso por su toxicidad y su generación es continua dado que es resultado de una decantación de partículas que luego de ser retiradas están contenidas en el medio fluido que es el orgánico.

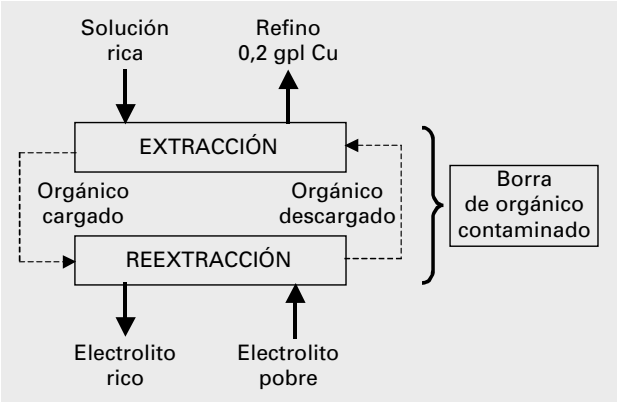


Figura 9.52. Diagrama de funcionamiento del proceso de extracción por disolventes, y su residuo característico.

Tabla 9.16. Tipos de electrolitos y cátodos para la extracción de diferentes minerales

Metal	Electrolito	Cátodo
Antimonio	Soda y sulfuro de sodio	Acero
Cadmio	Solución de sulfato	Aluminio
Cromo	Solución de sulfato	Hastelloy
Cobalto	Solución de sulfato	Acero inoxidable
Cobre	Solución de sulfato	Acero inoxidable
Galio	Solución de soda (NaOH)	Acero inoxidable
Manganeso	Solución de sulfato	Acero inoxidable
Níquel	Solución de sulfato	Níquel o acero inoxidable
Oro	Solución de cianuro	Lana de acero
Plata	Solución de nitrato	Plata o grafito
Telurio	Solución de soda (NaOH)	Acero inoxidable
Zinc	Solución de sulfato	Aluminio
	Solución de soda (NaOH)	Acero inoxidable

6.1.2. Electro-obtención o electrólisis (EW)

Corresponde a la recuperación del elemento de interés de una solución por medio de un proceso electrometalúrgico. Mediante este proceso se recupera el elemento de interés para producir cátodos. La Figura 9.53 muestra el principio de funcionamiento del proceso.

La solución electrolítica que contiene el metal de interés es llevada a las celdas de electro-obtención, estanques rectangulares, que tienen dispuestas en su interior y sumergidas en solución.

En su interior existen dos tipos de placas, la correspondiente al ánodo (polo positivo, por donde entra la corriente) y el cátodo (polo negativo, donde sale).

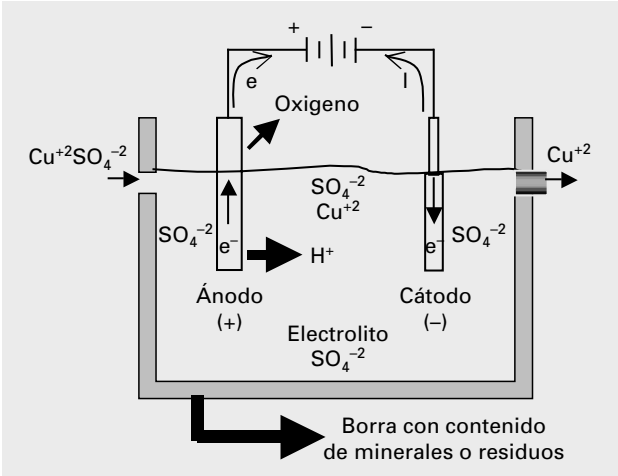


Figura 9.53. Esquema básico de un sistema de electrolisis o electro-obtención aplicado al cobre.

La solución que transporta el catión es atraído por el polo negativo representado por los cátodos, por lo que migra hacia éstos pegándose partícula a partícula en su superficie en forma metálica (carga cero).

Normalmente el principal residuo de este proceso son las borras acumuladas luego de la precipitación de otros elementos contenidos en la solución portadora, además del desgaste de los ánodos. Antes de ser considerado residuo, hay que verificar que estas borras no contengan precipitados de otros minerales de valor.

6.1.3. Proceso de cementación

Consiste en la precipitación de un metal desde una solución acuosa por efecto de otro metal presente en la solución. Para lograrlo se usa como principio el potencial de electrodo que tengan los metales involucrados, así el metal con potencial de electrodo más alto tiene mayor tendencia a la oxidación y pasará a la solución desplazando al metal que tenga un menor potencial. Su nombre deriva del hecho de que el metal precipitado se deposita o «cementa» sobre el metal añadido. Esto ocurrirá siempre y cuando las soluciones sean diluidas y el ión del metal no esté formando complejo, ya que el potencial de electrodo puede cambiar.

La ecuación siguiente describe el proceso de reacción en la cementación del cobre:

$$Fe^{0} + Cu^{+2}(sol) \rightarrow Cu^{0} + Fe^{+2}(sol)$$

Dicha reacción podría ser realizada con aluminio o zinc, pero con costos considerables, bajo el mismo principio de potencial de electrodo.

La cementación en fase líquida presenta las siguientes ventajas:

- Gran velocidad en la reacción.
- El precipitado puede separarse con facilidad sin contaminación.
- Se puede reciclar la solución gastada final y proceder a su estado reducido anterior con algún otro proceso sencillo.
- Presenta una gran economía de espacio y de costos de operación.

Una planta de cementación tiene una inversión menor a una planta de electro-obtención, no obstante requiere de un proceso de fundición de los cementos obtenidos. La Figura 9.54 muestra un resumen de lo explicado.

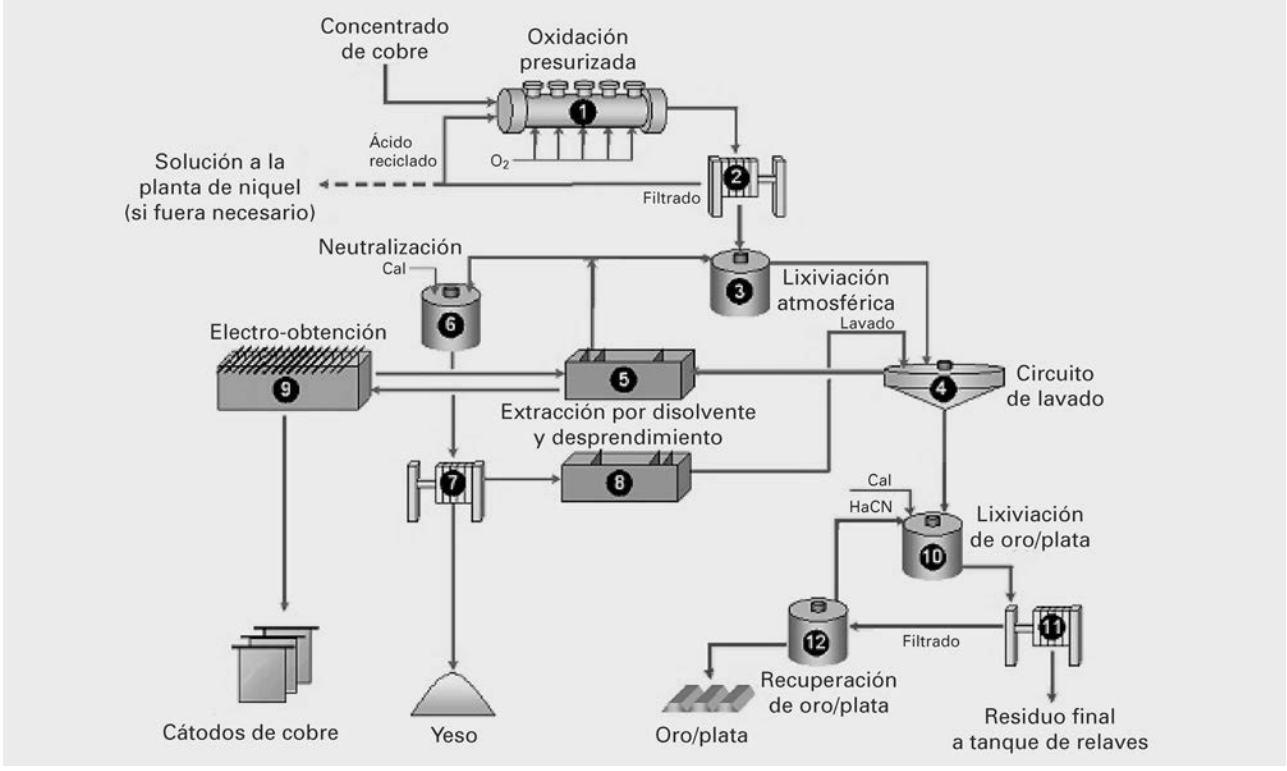


Figura 9.54. Proceso de cobre / Metales preciosos CESL (Fuente, http://www.cesl. com/spanish/copperprocess.html)

6.2. VÍA SECA O PIROMETALURGIA

Este tipo de proceso habitualmente se aplica a los sulfuros que normalmente son los minerales de mayor abundancia en la mayoría de los metales de interés comercial.

Básicamente consiste en tres etapas bien definidas que prácticamente son universales, cambiando el proceso según el tipo de mineral de interés.

La vía seca es un proceso que, normalmente, produce mayor impacto al medio por sus características de consumo energético, emisiones, transformaciones químicas que, con frecuencia, corresponden a residuos peligrosos.

Este tipo de beneficio comienza por una concentración gravitacional, cementación, flotación, etc., procesos utilizados para llegar a los primeros pasos del beneficio por pirometalurgia. La etapa siguiente se inicia con el proceso de fundición. En ella, el concentrado se somete a procesos de pirometalurgia en hornos a elevadas temperaturas, mediante los cuales el mineral del concentrado es transformado en metal que se separa de los otros minerales.

El proceso de fundición se realiza en diversas etapas:

a) Tostación (optativo).
b) Fundición de matas.
c) Conversión.
d) Piro refinación.

6.2.1. Tostación

La tostación es la etapa por la que se logra la oxidación parcial de sulfuros y su transformación en óxidos y SO_2. Este proceso se puede realizar cuando los concentrados reaccionan a temperaturas comprendidas entre los 500 ℃-700 ℃ (también es utilizada en algunas compañías para oxidar los residuos que contienen arsénico de As^{+3} a As^{+5}). El producto final llamado «calcinado» tiene una composición variable de óxidos, sulfatos y algunos sulfuros que dependerá del control de la temperatura.

Por lo general, este tipo de proceso permite la recuperación de SO_2 así como su paso a ácido sulfúrico, luego de convertir el anhídrido sulfuroso a anhídrido sulfúrico (SO_3) en seco y recuperado por vía húmeda.

6.2.2. Fundición de eje o matas

El objetivo de esta etapa es formar una fase líquida de sulfuro (mata) el cual es oxidado teniendo como resultado a la salida el mineral fundido, escorias y gases.

Este tipo de fundición tiene como principal objetivo lograr la separación por densidad del mineral de interés segregando la escoria por inmiscibilidad.

La fusión corresponde a una etapa de concentración a alta temperatura. En esta se rompe el conglomerado mineralógico para liberar la especie metálica de interés. La alimentación a las unidades de fusión (hornos) pueden ser básicamente concentrados (productos de flotación) o calcinas (productos de tostación). La tostación puede ser una etapa previa a la fusión que permita la eliminación de elementos volátiles (azufre, arsénico, antimonio, selenio, etc.) al calentar los concentrados en presencia del oxígeno del aire a temperaturas que suelen llegar a los 800 ℃.

Una vez alcanzada la temperatura o punto de fusión es necesario aplicar más calor para poder transformar el metal o la aleación de sólido a líquido. Durante este período la temperatura no aumenta y la cantidad de calor aportado es denominado calor latente de fusión. Si cuando toda la masa es líquida se continúa suministrando calor, la temperatura se incrementa y el metal se recalienta apareciendo el peligro de la volatilización.

La Tabla 9.17 indica los puntos de fusión, calores específicos medios y calores latentes de fusión de algunos de los metales y aleaciones más corrientes empleados en fundición.

Tabla 9.17. Puntos de fusión, calores específicos medios y calores latentes de fusión de algunos metales y aleaciones

Metal o aleación	Temperatura de fusión °C	Calor específico del sólido	Calor específico del líquido	Calor latente de fusión
		kcal/℃ · kg	kcal/℃ · kg	kcal/kg
Estaño	232	0,056	0,061	14
Plomo	327	0,031	0,04	6
Zinc	420	0,094	0,121	28
Magnesio	650	0,25	—	72
Aluminio	657	0,23	0,39	85
Latón	900	0,092		—
Bronce	900 a 960	0,09	–	—
Cobre	1.083	0,094	0,156	43
Fundición gris	1.200	0,16	0,20	70
Fundición blanca	1.100	0,16	—	—
Acero	1.400	0,12	—	50
Níquel	1.455	0,11	—	58

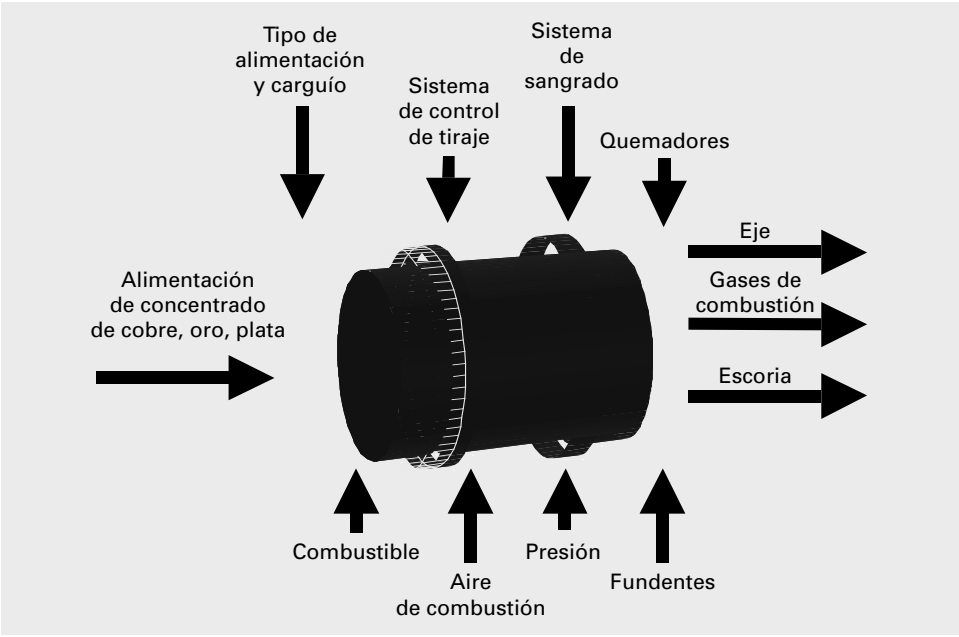


Figura 9.55. Entradas y salidas del proceso de conversión.

Dependiendo del tipo de reactor a emplear en la fusión se debe establecer el nivel de humedad de los concentrados. Por ejemplo, para el uso de un horno de fusión tipo «*flash*» se debe secar el concentrado de cobre (proceso de secado térmico) para reducir la humedad hasta valores inferiores a un 0,2%.

La fusión de concentrado y calcinas genera dos fases líquidas con características muy distintas. La mata que corresponde a la fase metálica es donde se concentra el metal y la otra fase líquida correspondiente a la escoria que difiere en su densidad permitiendo su separación, tras la adición de fundentes y escorificantes.

6.2.3. Proceso de conversión

La conversión consiste básicamente en la oxidación (con aire) de la mata proveniente de la etapa de fusión permitiendo diferenciar por peso específico el metal puro y las escorias a las que se les ha reducido su peso específico al oxidarlo. La Figura 9.55 esquematiza el proceso.

El producto de la conversión es un metal impuro que contiene niveles importantes de azufre, oxígeno, además de los otros metales que se concentraron en la mata durante la fusión.

Mediante el proceso de conversión se tratan los productos obtenidos en la fusión para obtener metales de alta pureza.

6.2.4. Proceso de pirorrefinación

La mata obtenida en la fusión debe ser convertida en metal. Esta operación se realiza en las unidades de conversión llamadas convertidores. En ellas se eliminan en forma progresiva el hierro y el azufre de la mata mediante la oxidación de éstos por el oxígeno del aire que se insufla en el convertidor que opera a elevadas temperaturas.

En el proceso se genera una gran cantidad de escoria y de anhídrido sulfuroso (SO_2). Este último es alimentado a una planta de ácido sulfúrico ya que no puede ser emitido directamente a la atmósfera. Es importante destacar que la conversión es un proceso autógeno ya que las reacciones de oxidación generan toda la energía requerida por el proceso.

7. Legislación

La relación siguiente resume las principales leyes y disposiciones legales referentes a las actividades mineras.

- Ley (de 21 de julio de 1.973) y Reglamento de minas (de 25 de agosto de 1978).
- REAL DECRETO 2994/1982, de 15 de octubre, sobre restauración de espacio natural afectado por actividades mineras.
- Real Decreto 1116/1984, de 9 de mayo, sobre restauración de espacio natural afectado por las explotaciones de carbón a cielo abierto y el aprovechamiento racional de estos recursos energéticos.
- Orden de 13 de junio de 1984 sobre normas para la elaboración de los planes de explotación y restauración del espacio natural afectado por las explotaciones mineras de carbón a cielo abierto.
- Orden de 20 de noviembre de 1984, que desarrolla el Real Decreto 2994/1982, sobre restauración de espacios naturales afectados por actividades extractivas.
- Directiva 85/377/CEE, de 27 junio de 1985. (Modificada por la Directiva 97/11/CE).
- Real Decreto Legislativo 1302/1986, de 28 de Junio, de Evaluación de Impacto Ambiental. (Modificado por Real Decreto 9/2000, de 6 de octubre).
- Decreto 1131/1988, de 30 de septiembre, por el que se aprueba el Reglamento para la ejecución del Real Decreto Legislativo 1302/1986, de 28 de junio, de Evaluación de Impacto Ambiental.
- Directiva 97/11/CE del consejo de 3 de marzo de 1997 por la que se modifica la Directiva 85/337/CEE relativa a la evaluación de las repercusiones de determinados proyectos públicos y privados sobre el medio ambiente.
- Ley 6/2001, de 8 de mayo, de modificación del Real Decreto Legislativo 1302/1986, de 28 de junio, de Evaluación de Impacto Ambiental.

Bibliografía

ADEME. Caractérisation des matériaux considérés comme inertes. Rapport Final. 1993.

ARTECHE RODRIGUEZ, F. *Guia per a la implantació i el desenvolupament d'un sistema de gestió mediambiental.* Generalitat de Catalunya, 1997..

ALONSO, AGUILO y RAMOS. Trabajos de la Cátedra de Planificación E.T.S.I.M. Madrid (1983). *Directrices y técnicas para la estimación de impactos.*

BIiblioteca de textos legales, *Legislación del medio ambiente.* Editorial Tecnos S.A. Madrid, 1992..

C.I.E.C.S.A. y ITGE, *Minería y medio ambiente.* ITGE, Madrid, 1988.

GARCÍA ÁLVAREZ, A., *Guía práctica de evaluación de impacto ambiental*. Amaru Ediciones y Casa de la Ecología, S. L. Salamanca, 1994.

GARCÍA RODRIGUEZ, J. J. *et al. Guía para la restauración del medio natural afectado por la explotación de canteras.* Instituto Geológico y Minero de España. Madrid, 1985.

Generalitat de Catalunya (D.P.T.O.P.) (1987). *Recomanacions tècniques per a la restauració y condicionament dels espais afectats per activitats extractives.*

ITGE y EPM S.A. *Manual de restauración de terrenos y evaluación de impactos ambientales en minería.* ITGE, Madrid, 1989.

ITGE y Estudios y Proyectos Mineros, S. A., *Manual de reutilización de residuos de la industria minera, siderometalúrgica y termoeléctrica.* ITGE, Madrid, 1995.

ITGE, *Evaluación y corrección de impactos ambientales.* ITGE, Madrid, 1992.

ITGE, *Legislación ambiental aplicable a la minería Nacional, Autonómica y Comunitaria.* ITGE, 1989.

ITGE. (1989). *Legislación ambiental aplicable a la minería nacional, autonómica y comunitaria*. Madrid.

ITGE. (1989). *Manual de restauración de terrenos y evaluación de impactos ambientales en minería.* Madrid.

Junta de Residus. *Aprofitament de residus en la construcció*. Generalitat de Catalunya, 1995.

MATAIX, C. Acid mine drainages treatment by passive systems: An experience in Limeisa coal mine (La Coruña, Spain). Revista: *Mine, Water enviroment.* 1999. JMWA Congres, Sevilla.

MOPT, *Medio ambiente en España.* Secretaría General Técnica, Centro de publicaciones y el MOPT. Madrid, 1993.

Oficina de Publicaciones Oficiales de las Comunidades Europeas. *Legislación comunitaria relativa al medio ambiente, Vol. 6: Residuos.* Luxemburgo, 1996.

MOPU. (1989). Monografías de la Dirección General de Medio Ambiente. Guías metodológicas para la elaboración de estudios de impacto ambiental-1.*Carreteras y ferrocarriles.* Madrid.

SEOANEZ CALVO, M. *et al. Ingeniería medioambiental aplicada: Casos prácticos.* Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, 1997.

Trabajos de la Cátedra de Planificación E.T.S.I.M. M. (1983). *Tratamiento funcional y paisajístico de taludes artificiales.* Madrid.

Aprovechamiento de residuos agrícolas y forestales

10

Álvaro Marcelo Canales, Xavier Elias, Maribel Herrero

ÍNDICE

1.. Definiciones e introducción 699
1.1. Ciclo del carbono 700
1.2. Aplicaciones generales de la biomasa 702
1.3. Biomasa y recursos naturales 702
2.. Origen y fuentes de la biomasa 703
2.1. Composición general de la biomasa 703
2.2. Biomasa como fuente de energía 704
2.3. Caracterización de la biomasa 707
2.4. Noción de biorrefinería 709
3. Estrategias para la valorización energética de la biomasa 710
3.1. Aprovechamiento energético de la biomasa a través de la producción de biocombustibles líquidos 711
3.2. Obtención de biocombustibles a través de procesos termoquímicos 716
3.3. Aprovechamiento energético de los residuos a través de la combustión o incineración. 720
3.4. Aprovechamiento energético a través de la producción de biogás. 724
3.5. Resumen de alternativas para la valorización energética de la biomasa 727
3.6. Otras valorizaciones de la biomasa residual 727
4. Potencial de aprovechamiento y costos de la biomasa 730
4.1. Cultivos energéticos 730
4.2. Generación de residuos de la industria agrícola y ganadera 734
4.3. Generación de residuos de la industria forestal 741
4.4. Fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos 742
5. Impacto ambiental del aprovechamiento de los residuos agrícolas y forestales 743
5.1. Emisiones causadas por el aprovechamiento energético de la biomasa 743
5.2. El suelo como recurso 745
5.3. Balance energético 748
5.4. Otros efectos ambientales 748
5.5. Consideraciones ambientales generales 749
6. Funcionamiento esperado en una instalación de valorización de residuos forestales 750
6.1. Parámetros de funcionamiento y diseño de una instalación 752
6.2. Resumen de la generación de biocombustibles 753
6.3. Valoración de los residuos forestales de poda y tala 755
7. La sostenibilidad 756
7.1. Los incendios forestales 758
7.2. El bosque como sumidero de CO_2 760
7.3. Un nuevo concepto de gasificación de biomasa 761
7.4. Posibilidades de la pirólisis de la biomasa .. 766
7.5. Estado de la tecnología en la obtención del hidrógeno a partir de la conversión energética de la biomasa 768
8. Caracterización de los residuos para su valorización energética 769
8.1. Propiedades físicas y químicas de la biomasa 769
8.2. Cálculo de la potencia calorífica inferior 771
8.3. Diagrama de combustión 771
8.4. Balance de materia y energía 775
8.5. Barámetros del cálculo de un incinerador ... 777
8.6. Viabilidad económica de una planta de incineración de biomasa 780
Bibliografía 782

RESUMEN

Este capítulo recopila los antecedentes relacionados con el aprovechamiento de los residuos generados por la industria agrícola y forestal, con una introducción de los ciclos productivos asociados específicamente al ciclo del carbono, la producción de biomasa y la productividad de los ambientes naturales.

La revisión continúa con una descripción de los procesos y de las técnicas de aprovechamiento de los residuos, especialmente biomasa residual, con fines energéticos y otros como el compostaje o la fertilización de suelos. Incluye una descripción de los sistemas de producción agrícola y forestal diseñados específicamente con fines energéticos.

La parte central del capítulo se destina al análisis de los impactos ambientales que se pueden presentar debido al aprovechamiento de los residuos y se realiza un ejemplo de explotación de biomasa forestal.

Al final se exponen unos ejemplos prácticos de valorización energética de la biomasa.

1. Definiciones e introducción

Los sectores productivos relacionados con la producción de alimentos y el uso y aprovechamiento de recursos naturales, como son las actividades agrícola, forestal y otros como la pesquera, han visto la necesidad, cada vez creciente, de aumentar la eficiencia productiva de sus procesos, al generar bienes y productos relacionados directamente a las cadenas productivas, y demandas crecientes por parte de la población, que han aumentado en tasas elevadas en las décadas anteriores.

Dichos sectores productivos generan bienes básicos de consumo aprovechando sistemas naturales que se ven afectados si la demanda aumenta de manera creciente. En esencia, la base de los sistemas productivos continúa igual ya que estas actividades basan el suministro de sus materias primas en los procesos naturales que se dan en la biosfera y que por miles de años han permitido el desarrollo y sustentación de la vida en el planeta.

Los ciclos productivos tradicionales han dado paso a la incorporación de técnicas y equipos que han permitido incrementar la productividad, con el consecuente aumento de materias primas, la generación de residuos, uso extensivo de las superficies cultivables y como consecuencia, impactos ambientales asociados a estas actividades.

Por un parte la actividad agrícola convencional ha derivado en el desarrollo de variedades de frutas y verduras manipuladas genéticamente, que han permitido mayores tasas de producción y han mejorado las condiciones de conservación de los alimentos. Además, a través del desarrollo de sofisticadas técnicas de riego y fertilización se ha logrado transformar terrenos infértiles en verdaderos oasis de cultivos, lo cual ha permitido la obtención de productos frescos en regiones en las que antiguamente no era posible. Estos factores han contribuido a acrecentar la producción mundial agrícola, satisfaciendo las necesidades básicas de un buen porcentaje de la población, a pesar del explosivo aumento de habitantes sobre todo en países en vías de desarrollo. Una situación similar se ha dado en la producción ganadera, donde se ha pasado de una ganadería extensiva en territorio, a una intensiva en pequeños rebaños de animales. Todos los sistemas productivos actuales permiten controlar adecuadamente las variables climáticas, lo cual beneficia las altas productividades y rentabiliza las inversiones efectuadas.

El sector forestal posee una dinámica similar, ya que su desarrollo se ha fundamentado en la selección de especies que mejor se adapten a las condiciones climáticas de una región y sobre esas especies se efectúan mejoras a nivel genético, que permitan mayores tasas de crecimiento. Además, la industria maderera ha introducido tecnología a sus procesos lo que permite mejores rendimientos en la transformación de la madera y una mayor durabilidad de los productos.

Estas transformaciones en los mercados de productos agrícolas y forestales ha conducido a un aumento en la tasa de generación, lo cual trae como consecuencia un aumento en la producción de residuos asociados a estas actividades, y que se componen casi exclusivamente en biomasa residual, similares a los productos que les dan origen, y no se aprovechan habitualmente debido a que no son productos en sí. Los residuos generados por estas actividades poseen entonces un alto potencial de aprovechamiento, considerando que son producidos en forma continua y extendida en todos los ambientes y por lo tanto la accesibilidad a dichos recursos no se ve afectada por condiciones específicas del territorio. Desde este punto de vista son una fuente importante de recursos, considerando además que provienen de un ciclo biogeoquímico y por lo tanto una fuente renovable que perdurará en el tiempo y que de utilizarse en forma sustentable permite una fuente inagotable de recursos que depende del Sol como precursor principal en el proceso.

No cabe duda de que en los próximos años se asistirá a una explosión de nuevos descubrimientos de especies, en particular algas, y una profundización en la obtención de vegetales modificados genéticamente. Así, en el sur de la costa Patagónica (Argentina) se han descubierto unas algas de aplicación energética. Una hectárea de soja produce 400 litros de aceite, mientras que estas algas, a igualdad de superficie, pueden producir mas de 100.000. Es decir una productividad 250 veces superior sin interferir en un doloroso debate ético que cuestiona el destino de plantas alimenticias, soja, a la fabricación de biocarburantes.

En el campo de la zoología, un reciente descubrimiento de la naturaleza de los microbios que viven en uno de los estómagos de las termitas ayuda a entender cómo estos microorganismos pueden transformar la lignina en energía.

El genetista visionario Craig Venter ha catalogado ya miles de genes especializados en captar luz de distintas longitudes de onda. Planea crear una bacteria artificial que lleve una ristra de ellos y pueda aprovechar un espectro muy amplio de la luz. La futura bacteria convertiría en hidrógeno un 10% de la energía solar recibida, y una superficie de cultivo de 13.000 kilómetros cuadrados bastaría para subvenir todas las necesidades energéticas de transporte en los EE UU. Entre 2005 y 2006 el citado investigador y sus colaboradores en una travesía oceánica, han conseguido detectar más de seis millones de nuevos genes y proteínas de microbios marinos con las funciones más sorprendentes. Desde genes que permiten aprovechar la energía solar en formas novedosas a otros que ayudan a usar el nitrógeno, pasando por los que otorgan protección contra los rayos ultravioletas.

Investigadores de la universidad de Berkeley (California, EE UU) descubrieron que ciertas algas (*Chlamydomonas reinhardtii*) sometidas a luz solar y privadas de azufre y oxígeno, generaban hidrógeno durante largos periodos de tiempo y en cantidades apreciables (3 l/h de H_2 por litro de cultivo durante cuatro días).

1.1. CICLO DEL CARBONO

El conjunto de la biomasa que existe en la tierra tiene como origen el ciclo del carbono que directa o indirectamente permite la fijación del CO_2 de la atmósfera en los tejidos vegetales y animales y, de esta forma, la formación y acumulación de biomasa.

La producción primaria de la biosfera comprende la transformación de la energía lumínica del sol en energía química, por acción de organismos fotosintéticos. Estos organismos poseen la capacidad única de recoger la radiación solar y, mediante procesos bioquímicos, utilizarla para sintetizar estructuras carbonadas que sirven de sustento para la vida. El proceso permite la acumulación de dichos compuestos en las estructuras celulares de estos organismos, permitiendo el crecimiento de complejas formas de vida, que representan la base de todas las demás cadenas tróficas que existen en el planeta. Los organismos fotosintéticos poseen esta cualidad, que no es compartida por otros organismos vivientes, y por lo tanto la producción primaria se transforma en la pieza clave de la existencia de las otras formas de vida en el planeta.

La biomasa que se genera se aprovecha luego por otros organismos que la consumen y la transforman en una biomasa de carácter secundario, generando nuevas estructuras celulares, que son el resultado de transformaciones posteriores de la generada en la producción primaria de la biosfera.

1.1.1. Fotosíntesis

La cantidad de radiación, energía, que llega del Sol es enorme, del orden de 170.000 TW ($173 \cdot 10^{15}$ W), es decir miles de veces la energía que el hombre consume. Teniendo en cuenta el área del planeta, el flujo solar sobre la Tierra en todos los puntos es de 342,5 W/m^2. Buena parte de ella es reflejada al espacio exterior resultando que, la energía efectiva que alcanza la superficie terrestre, de promedio, es de 170 W/m^2.

Una parte ínfima de este flujo energético (algo más del 0,5%) es empleado para la creación de la biomasa, a razón de $30 \cdot 10^{10}$ t/año, equivalentes a $868 \cdot 10^3$ TWh o $7{,}5 \cdot 10^{10}$ tep, es decir casi seis veces el consumo mundial de energía en 2002.

Las plantas producen, de promedio una energía de $5 \cdot 10^3$ kcal/m^2 y año. Llevando a cabo cálculos teóricos sobre una superficie de $1{,}5 \cdot 10^{14}$ m^2 resulta una energía transferida (sol/biomasa) de $7{,}5 \cdot 10^{17}$ kcal/año o $8{,}7 \cdot 10^{14}$ kWh/año o sea una potencia media de 100 Tw.

La radiación ejerce sobre el océano un fenómeno muy complejo donde cada día se van esclareciendo parámetros adicionales, en particular los relacionados con el mar ya que ocupa el 75% de la superficie del planeta. Así, en 2006, científicos del Instituto de Ciencias del Mar de Barcelona han descubierto que la radiación solar cuando actúa sobre el plancton marino produce dimetilsulfuro (DMS) que cuando interacciona con el agua que forman las nubes da lugar a un «efecto parasol» a escala global.

El ciclo del CO_2 comienza con la fotosíntesis, un proceso complejo que tiene lugar en los organismos vegetales que poseen orgánulos, localizados en el interior de las células, llamadas cloroplastos. El proceso permite reducir la molécula de CO_2 y la transforma en azúcares, para lo cual la radiación solar eleva el potencial de los electrones, entregando la energía necesaria para la formación de las moléculas de azúcares y la liberación del O_2 presente en el H_2O.

La ecuación global de la fotosíntesis es la que sigue:

$$CO_2 + H_2O = (HCOH) + O_2$$

El carbono fijado es la base para la composición de las estructuras celulares de animales y vegetales.

El CO_2 es liberado luego a través de la respiración celular que se da en todos los organismos vivos, por las emisiones que se producen en la combustión de biomasa y por la descomposición de los organismos muertos. Esquemáticamente el ciclo se presenta en la Figura 10.1.

La fotosíntesis permite la generación de biomasa, utilizando como fuente de energía la luz proveniente del Sol, para luego alimentar otras cadenas tróficas presentes en la biosfera. La biomasa disponible comprende el conjunto de materia orgánica presente en la tierra, y posee un carácter renovable al tener su origen en la radiación solar, asumiendo una función de fuente inagotable de recursos. Si bien combustibles fósiles y derivados de ellos poseen un origen también asociado a la cadena de producción primaria fotosintética, no son considerados parte disponible de la biomasa, ya que son depósitos que fueron generados en una escala de tiempo de miles o millones de años, muy superior a una escala humana y participan en ella procesos geológicos que no necesariamente se repetirán, por lo que no pueden ser considerados como elementos activos del ciclo del carbono y por ello como parte de la biomasa disponible en la biosfera.

Antes de la revolución industrial, los combustibles fósiles no estaban participando del ciclo del CO_2 y, después de su descubrimiento y el desarrollo de tecnologías para su utilización masiva, han sido liberados en forma acelerada y por lo tanto han alterado el equilibrio natural, favoreciendo con ello el efecto invernadero.

Si bien la biomasa representa sólo una pequeña parte en la masa total de la Tierra, su importancia es vital, ya que es el gran reservorio de energía para que la vida se sustente en el planeta, a pesar de que sólo aprovecha una fracción de la energía que es entregada por el Sol, y fijada por los organismos fotosintetizadores. La alteración de dicho ciclo influye directamente en la existencia de la vida sobre la Tierra, ya que permite el suministro de oxígeno a la atmósfera y a todos los organismos que requieren de él para su existencia.

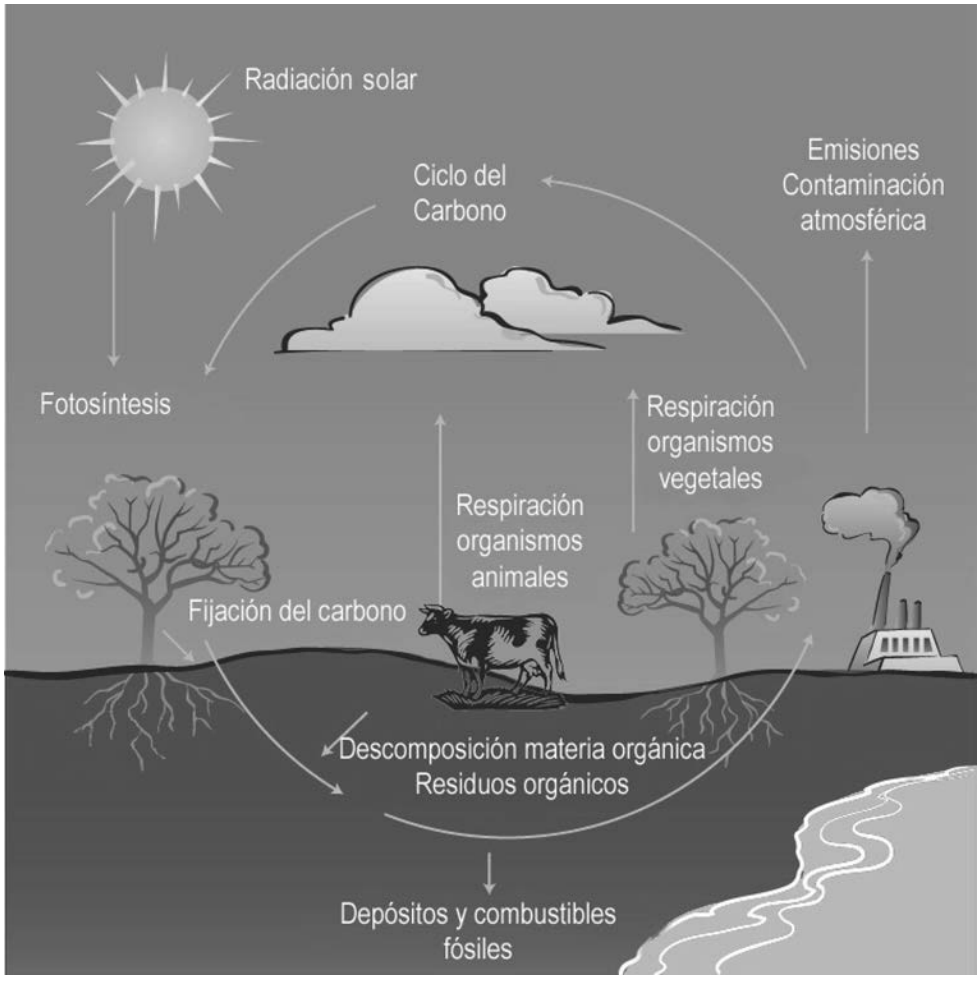


Figura 10.1. El ciclo del carbono.

1.2. APLICACIONES GENERALES DE LA BIOMASA

La biomasa posee una serie de aplicaciones desde el punto de vista energético y de su utilización como insumos del sector industrial, especialmente en las industrias químicas. En términos generales esto se puede observar en el diagrama de la Figura 10.2.

La biomasa producida posee en general, a excepción de los cultivos energéticos, un uso primario asociado a los consumidores finales, ya sea como alimento o bien materias primas para producir papel o productos químicos.

1.3. BIOMASA Y RECURSOS NATURALES

Sólo una parte de la radiación que emite el sol es utilizada por el proceso fotosintético; en términos generales la eficiencia es del orden del 0,05%, con lo cual en la biosfera la biomasa producida anualmente es aproximadamente $1{,}7 \times 10^{14}$ kg, equivalente a unas 68.000 millones de toneladas de petróleo equivalentes ($68 \cdot 10^9$ tep, o bien $748 \cdot 10^9$ MW · h). El rendimiento de la fotosíntesis a nivel individual, por ejemplo en un campo de cultivo, es mucho mayor.

La Tabla 10.1 muestra claramente la importancia de los bosques como productores de biomasa y fijadores de CO_2 en el ciclo del carbono. Suponiendo un uso energético de ella, permitiría suplir los requerimientos de una buena parte de los países del mundo, estimándose que al año 2050 un 15% de los requerimientos energéticos mundiales pueden ser cubiertos a partir del aprovechamiento energético de la biomasa.

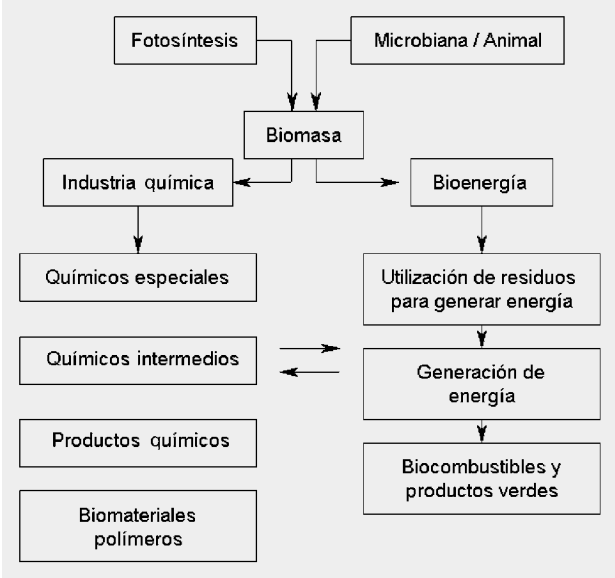


Figura 10.2. Aplicaciones generales de la biomasa.

Los residuos de biomasa, pueden ser utilizados, básicamente para las siguientes cinco labores principales:

- Fertilización de suelos.
- Sustrato productivo.
- Alimentación humana.
- Alimentación ganadera.
- Producción de energía.

Tabla 10.1. Producción primaria neta de los principales ecosistemas (Fuente: Field *et al* 1998).

Producción primaria neta biosfera (Petagramos de carbono = 10^{15} gramos)			
Océano		**Tierra**	
Oligotrófico	11,0	Bosques tropicales lluviosos	17,8
Mesotrófico	27,4	Bosques deciduos de hoja ancha	1,5
Eutrófico	9,1	Bosques mixtos	3,1
Macrófito	1,0	Bosques siempre verdes de hoja acidulada	3,1
		Bosques deciduos de hoja acidulada	1,4
		Sábanas	16,8
		Pastizales perennes	2,4
		Arbustos de hoja ancha con suelo desnudo	1,0
		Tundra	0,8
		Desierto	0,5
		Cultivos	8,0
Total	**48,5**	**Total**	**56,4**

Las primeras dos opciones permiten el empleo indistinto de biomasa de origen agrícola o forestal, al igual que el aprovechamiento energético.

La alimentación humana y ganadera, por otra parte, se refiere únicamente al uso de los residuos generados por la agroindustria y puede ser considerada para varios tipos de residuos de origen agrícola. Desde tiempos remotos los animales domésticos han sido alimentados con restos de frutas y verduras, y de la misma manera estos residuos pueden ser procesados para su uso e incorporación en alimentos destinados a consumo humano.

La fertilización de suelos comprende la utilización de biomasa residual para mejorar la calidad de taludes, terrenos pobres y erosionados, incorporando una mezcla que puede ser previamente compostada para mejorar la calidad de los nutrientes entregados.

Su utilización como sustrato productivo comprende la incorporación de biomasa residual como base en la producción de setas, lombrices o levaduras.

Finalmente, la producción de energía es una alternativa que surge con mucha fuerza ya que proporciona importantes beneficios dado el carácter renovable de la biomasa. Para ello existen diversas técnicas y equipos que permiten la obtención de energía para diferentes usos y aplicaciones, siendo la más versátil de ellas la generación de electricidad.

2. Origen y fuentes de la biomasa

Las fuentes de biomasa pueden ser clasificadas en dos grandes grupos: las de origen animal y las de origen vegetal. Cada una de las cuales puede considerar otros subgrupos. Esto, en términos globales, permite agrupar los residuos biomásicos en las siguientes cuatro categorías:

- Residuos agrícolas de cultivos e industrias agroindustriales.
- Residuos de explotaciones ganaderas.
- Residuos de biomasa presentes en los residuos sólidos urbanos (RSU) y asimilables.
- Residuos forestales, provenientes de actividades selvícolas e industrias transformadoras de madera.

La sumatoria de dichos residuos equivaldría a la disponibilidad total de biomasa utilizable para las actividades descritas, a lo cual es necesario sumar, cuando se considera el uso energético de la biomasa, todos aquellos cultivos que han sido diseñados con fines exclusivos para su aprovechamiento a través de su transformación energética.

2.1. COMPOSICIÓN GENERAL DE LA BIOMASA

La biomasa posee una composición típica desde el punto de vista cualitativo, pero no cuantitativo ya que la proporción de sus componentes varía dependiendo de cada especie vegetal o animal y de los procesos por los cuales ha sido generada.

La biomasa vegetal está compuesta principalmente de hidratos de carbono, en forma de compuestos lignocelulósicos o amiláceos, y, en menor, proporción prótidos, lípidos y compuestos orgánicos nitrogenados. Su composición varía debido a que las estructuras que forman la biomasa no son homogéneas en todos los órganos y por lo tanto dependen de la proporción de ellos en cada especie definiendo composiciones diferentes en cada caso. Por ejemplo, las semillas de leguminosas son muy ricas en proteínas, o las semillas de oleaginosas poseen un alto contenido de lípidos, por lo que no es posible facilitar un valor exacto de su composición.

Existe una variabilidad en la composición típica de la biomasa vegetal de diferentes especies, que relaciona las características de la especie y las condiciones de crecimiento. Una muestra de la composición típica de algunas tipos de biomasa es la indicada en la Figura 10.3.

Desde el punto de vista energético, aquella biomasa de estructura más sólida (madera) permite aplicaciones termoquímicas, y la de estructura poco sólida (como los cultivos agrícolas anuales) mayor variedad de aplicaciones, como la hidrólisis, cada una de las cuales será detallada en los apartados posteriores.

La composición específica de la biomasa permite, en los mercados internacionales, establecer los valores a los cuales se transaccionan los productos derivados de la biomasa. Según esto existe una correlación que establece que los productos de mayor producción, como son la celulosa, denominados «*commodities*» en terminología inglesa, son los de menor precio; por otra parte los productos químicos derivados de la biomasa que agrupan una gran canti-

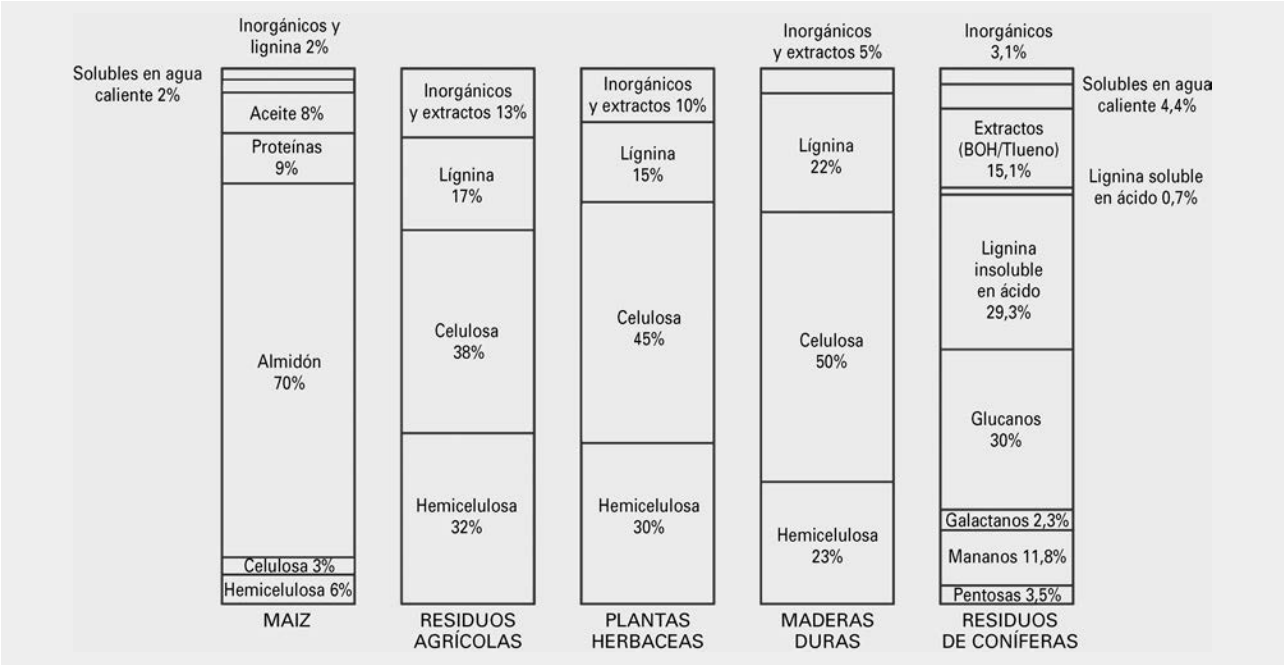


Figura 10.3. Composición general de la biomasa (% respecto del total).

dad de productos, con menores volúmenes comercializados y un mayor precio, para finalmente encontrar productos utilizados en la industria farmacéutica, que representan los de mayor precio.

2.2. BIOMASA COMO FUENTE DE ENERGÍA

La biomasa es un gran depósito de energía. Fue el primer combustible usado intensivamente hasta el inicio de la revolución industrial y continúa siendo además el principal recurso energético para millones de personas en el mundo. Surge así el concepto de biocombustibles, que se refiere a la fracción de biomasa susceptible de ser utilizada energéticamente, que pueden provenir tanto de residuos de procesos industriales, de la recogida selectiva de residuos municipales, de restos de actividades agrícolas, forestales o ganaderas como también de cultivos especialmente pensados con fines energéticos.

Desde el punto de vista energético usualmente se utiliza la biomasa residual generada en la etapa de cultivo, o bien los residuos producidos luego del aprovechamiento por parte de los consumidores, como por ejemplo la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (RSU) y en la etapa de transformación de la biomasa, especialmente dado por la fracción no utilizada comercialmente, como por ejemplo la corteza de los árboles. Lo anterior se complementa con la biomasa proveniente de cultivos energéticos que, por lo tanto, directamente pasan a contabilizarse dentro de la biomasa disponible para fines energéticos.

El desarrollo de otras aplicaciones energéticas de la biomasa, complementarias a la tradicional combustión directa utilizada desde tiempos remotos, ha permitido el surgimiento del concepto bioenergía, que se ha definido como la utilización intensiva, a través del desarrollo de procesos industriales, de biomasa para la generación de energía, considerando en ello su aprovechamiento directo o bien mediante la transformación y obtención de los denominados biocombustibles.

Esquemáticamente las fuentes de biomasa y los procesos generales que la generan, enfocados a un aprovechamiento como fuente de energía, pueden ser observados en la Figura 10.4.

Cada una de las fuentes genera diferentes tipos de biomasa que, de acuerdo a sus características, permiten su uso en diversas aplicaciones. Es posible clasificarla como sigue:

- *Biomasa de alto grado*. La biomasa de este tipo se caracteriza por su alta homogeneidad, lo que la hace especialmente adecuada para su uso energético. Proviene de cultivos energéticos, bosques y plantaciones.

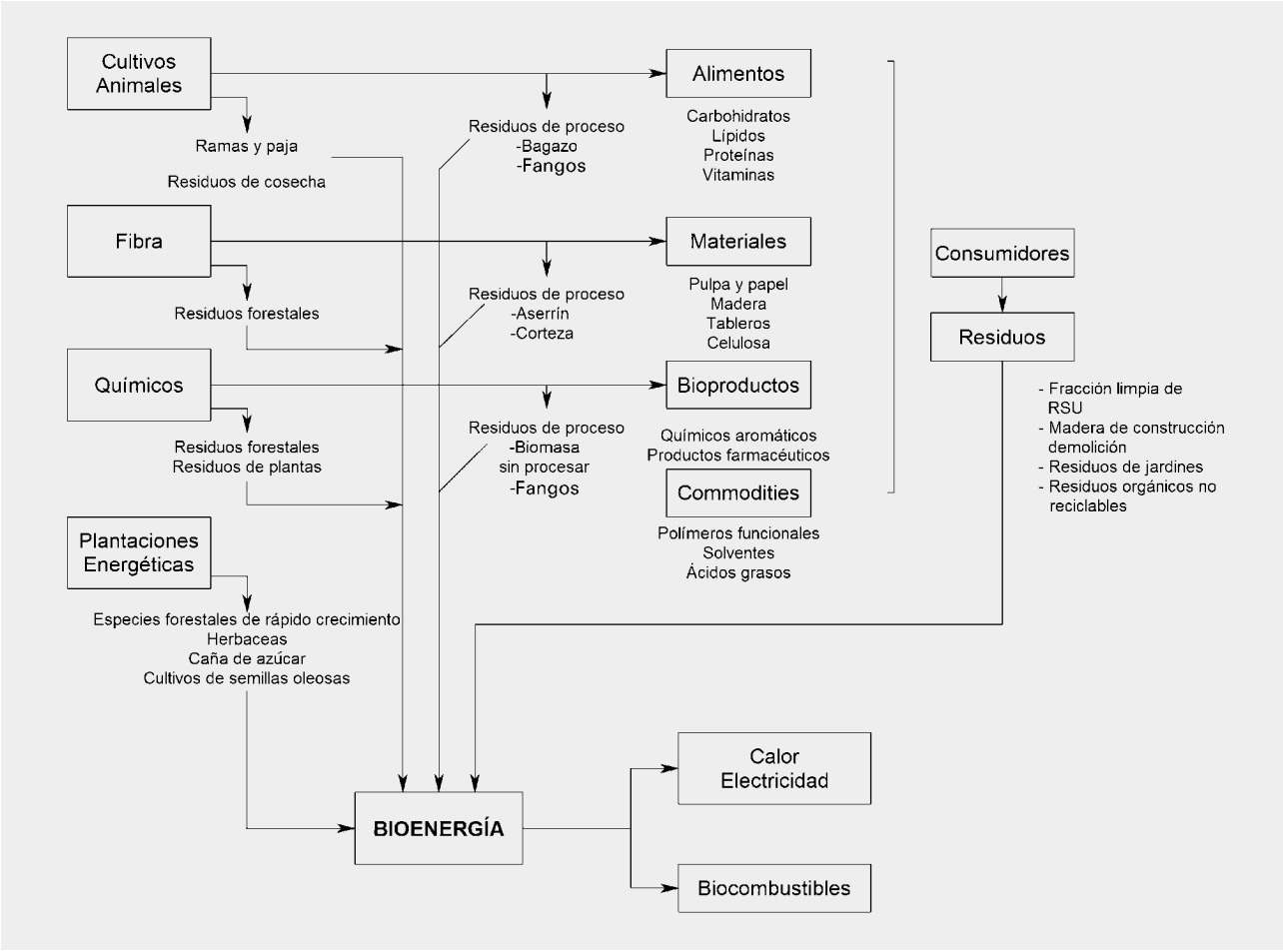


Figura 10.4. Procesos generales de generación y aprovechamiento de la biomasa.

- *Biomasa residual.* La biomasa residual puede ser químicamente homogénea y/o heterogénea, que proviene de residuos agrícolas, forestales y de procesos industriales, donde en cada caso puede estar compuesta por una o varias especies diferentes, lo cual determinará sus características químicas.
- *Biomasa de origen urbano.* Los residuos sólidos urbanos (RSU) poseen aproximadamente un 50% de peso húmedo de biomasa, siendo esencialmente heterogénea ya que proviene de diversas fuentes y han sido sometidas a diversos procesos. Además, existe un contenido de madera, que puede provenir de materiales de construcción y embalajes.
- *Fangos.* Es esencialmente de origen heterogéneo, ya que se obtiene principalmente de las plantas de tratamiento de aguas residuales, plantas industriales de procesamiento de ganado y agroindustrias.

Al considerar todas las posibilidades de aprovechamiento de los residuos agroalimentarios, biomasa en el sentido más extenso de la palabra, se debe pensar entre el valor conseguido por el producto o material recuperado y reciclado y el volumen de residuo que se ha conseguido reciclar. Desafortunadamente la relación suele ser inversamente proporcional: a mayor valor del producto obtenido tras el reciclaje menor es la masa de reciclado que representa. Un ejemplo claro de ello es la extracción de determinados productos de interés farmacológico de las hojas de algunos árboles para la obtención de un compuesto químico o bien la extracción de esencias a partir de rastrojos o semillas ya prensadas. En ambos casos el residuo secundario es del orden de miles de veces la masa del producto extractado, no obstante su valor es muy alto. En el caso de la biomasa, el residuo secundario siempre puede usarse como combustible para aportar el calor para la generación del vapor que se precisa en el proceso de síntesis.

Día a día crece el interés por rentabilizar la gestión de los residuos y explorar nuevas alternativas de valorización a través de la innovación. Por orden de valor económico, los residuos de la biomasa son:

- Farmacia y cosmética.
- Alimentación humana.
- Productos de uso industrial.
- Alimentación animal.
- Fertilizante y abonos.
- Combustible para valorización energética.

La estrategia más adecuada ha de ser tal que propicie un aprovechamiento integral que destine cada fracción al destino más eficiente.

Para dar una idea de la magnitud de las cifras, en España, la generación de residuos orgánicos considerados como biomasa, teóricamente valorizable, se muestra en la Tabla 10.2.

Tabla 10.2. Generación de biomasa residual en España.

Origen de biomasa residual	Mt/año
Residuos sólidos urbanos	24,0
Fangos de EDAR	8,5
Residuos forestales	18,0
Residuos agrícolas	35,0
Residuos ganaderos (cría y matadero)	85,0
Total	**170,5**

Estas cifras son tan importantes que, si se valorizaran con la tecnología disponible en la actualidad, se dispondría de una potencia eléctrica de 6 GW (es decir, el equivalente a 6 centrales nucleares convencionales).

En la actualidad varios países del mundo llevan a cabo extensos programa para el desarrollo de biocombustibles a partir de cultivos energéticos, con excelentes resultados en su aplicación, llegando a sustituir parte importante del consumo de hidrocarburos para la locomoción. Un ejemplo importante de ello es Brasil, donde en la década de los años 70, debido principalmente a la crisis del petróleo del año 1974, se estableció el mayor programa de utilización de biomasa, en forma de caña de azúcar, para la producción de alcohol que es utilizado como combustible de motores de combustión. Este programa ha tenido mucho éxito, ya que por un lado disminuye la importación de petróleo, y por lo tanto las emisiones a la atmósfera asociadas, y es una importante fuente de empleos en sectores más pobres de la sociedad ya que en la actualidad cerca de un millón de puestos de trabajo se asocian directamente a este mercado. Según estimaciones efectuadas por el programa Pro-alcool de Brasil, durante los primeros 25 años de funcionamiento del programa se ha dejado de importar petróleo por un monto de 40.000 millones de dólares, alcanzando una producción anual de 15.000 millones de litros de etanol en el año 2004. La mayoría de los vehículos hoy en día funcionan con una mezcla donde se incorpora un 20% de etanol en la gasolina, pudiendo alcanzar proporciones del 26%.

Otro importante productor de etanol a nivel mundial es EE UU que, a partir principalmente del maíz, ha conseguido producir mas de 13.000 millones de litros anuales (2004) de biocombustibles.

Un resumen de diferentes fuentes de biomasa, que pueden ser utilizadas con fines energéticos se presenta en la Tabla 10.3.

Las oportunidades de valorización de la biomasa residual y la proveniente de cultivos energéticos dependen principalmente de las características físicas y la composición química específica de cada tipo de biomasa. Si se efectúa una clasificación de la biomasa en términos de las posibilidades de valoriza-

Tabla 10.3. Fuentes de producción de diferentes biocombustibles. (Adaptada de la propuesta por el Instituto de Diversificación y Ahorro Energético de España (IDAE))

Recurso	Residuos
Residuos forestales	Ramas, restos de podas y de cosechas, copas de árboles.
Residuos agrícolas	Restos de cultivos leñosos, ramas.
	Restos de cultivos herbáceos industriales, tallos y plantas verdes.
	Pastos y restos de cereales.
Residuos de la industria forestal	Aserrín, virutas, cortezas y restos de maderas.
	Residuos de la industria de la celulosa y papel, licor negro, fangos de depuradoras.
Residuos de industrias agrícolas y agroalimentarias	Cáscaras, cuescos, semillas, hollejos, fangos de plantas depuradoras.
Residuos biodegradables	Residuos de la industria ganadera, purines, estiércol.
	Residuos de animales muertos, sangre, pieles.
	Fangos de la depuración de aguas urbanas e industriales.
Cultivos energéticos y excedentes agrícolas	Cultivos energéticos y residuos de otros cultivos.

ción, es posible identificar tres grupos que agrupan la biomasa según características físicas en: homogénea, no homogénea y heterogénea.

A partir de dicha clasificación es posible establecer y homologar alternativas de valorización energética de la biomasa residual. Las alternativas planteadas se presentan en la Figura 10.5.

Si bien es posible establecer una clasificación como la planteada en la Figura 10.5, la elección de la alternativa que permita optimizar la transformación de los residuos de biomasa en una fuente de energía, bioenergía, requiere del análisis de parámetros específicos a cada situación. Para ello una caracterización detallada desde el punto de vista físico y químico es primordial a la hora de definir la estrategia a emplear.

2.3. CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA

Hay varios aspectos a considerar cuando se plantea un aprovechamiento energético de la biomasa. En primer lugar se deber determinar una caracterización detallada de las características fisicoquímicas del biocombustible que se quiere utilizar, como su estado, densidad, humedad y composición química. La existencia de normas internacionales permite una evaluación clara y homologable que determina los parámetros para efectuar dichas pruebas.

Luego hay que determinar la capacidad energética del combustible y así poder establecer otros parámetros:

- Poder calorífico, que se define como la cantidad de energía que desprende 1 kilo de combustible.
- Cantidad de aire necesario para lograr la combustión completa de esta unidad de combustible.
- Eficacia del proceso de combustión.
- Temperatura del proceso de combustión.
- Cantidad de gases producidos durante el proceso de combustión.

2.3.1. Poder calorífico

Uno de los aspectos más importantes de los anteriormente nombrados es la determinación del poder calorífico, ya que permite estudiar las posibilidades de aplicación de la biomasa como combustible. Generalmente este parámetro se expresa en kcal/kg de combustible ya sea líquido o sólido. Parte de esta energía liberada es absorbida por el agua generada en la combustión debido a la presencia de hidrógeno en el combustible y evaporada en forma de vapor de agua. Se definen de esta manera el Poder Calorífico Superior (PCS), como la cantidad de calor despren-

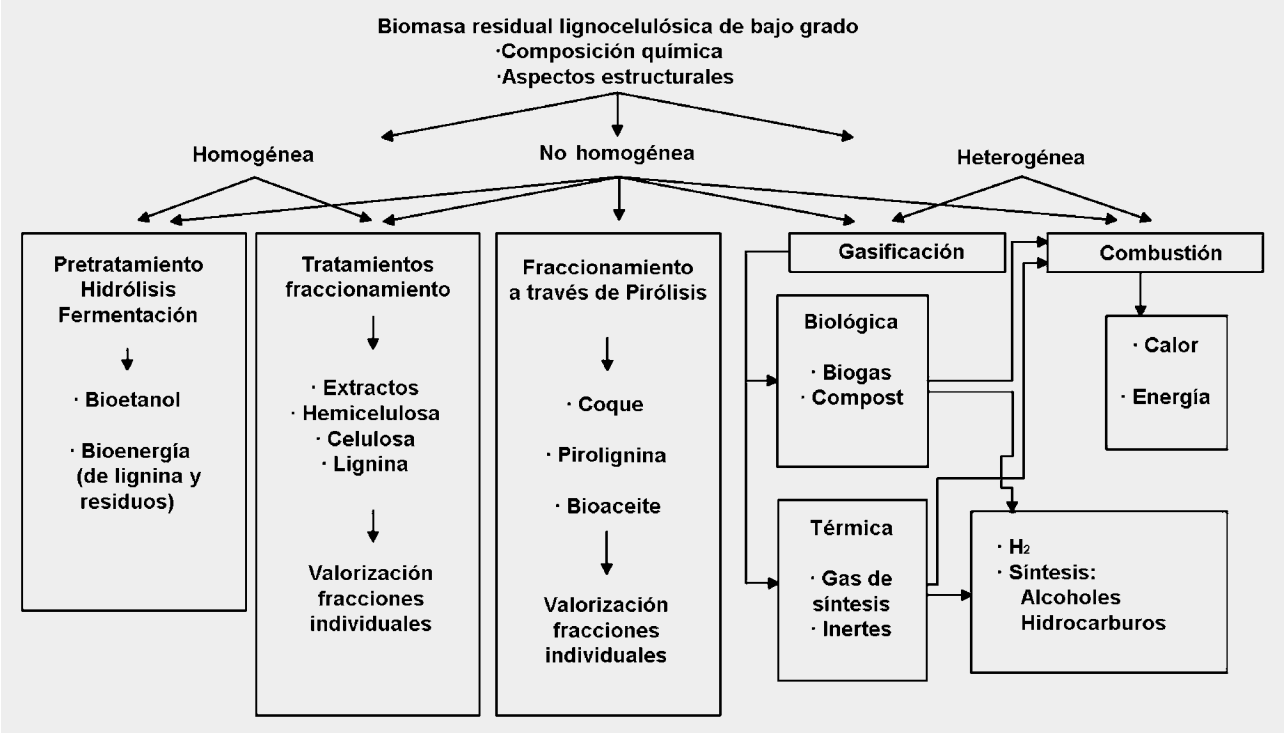


Figura 10.5. Estrategias para la valorización energética de la biomasa residual.

dida por unidad de masa de combustible anhidro (se mide por medio de una bomba calorimétrica, donde se enfrían o condensan los productos de la combustión) y el Poder Calorífico Inferior (PCI) como la cantidad de calor desprendido por unidad de combustible, sin enfriar o condensar los productos de la combustión, con lo que se pierde el calor contenido en el vapor de agua; corresponde así al PCS menos el calor latente de la vaporización del agua que es arrastrada por los gases de la combustión. El PCI de un combustible siempre se refiere al material seco.

La Tabla 10.4 muestra los poderes caloríficos de diversos combustibles.

En las aplicaciones industriales, sólo tiene sentido hablar del PCI, ya que los gases de combustión se emiten a la atmósfera a una temperatura superior a la de condensación del vapor de agua y, por lo tanto, no se aprovecha el calor latente del vapor.

Tabla 10.4. Poderes caloríficos de diversos combustibles y biomasas

Combustible	PCS (kcal/kg)	PCI (kcal/kg)
Biomasa de chopo seca	4.700	4.392
Madera de pino (15% de humedad)	4.800-5.000	4.500-4.700
Madera de fresno y encina	4.700	4.300
Madera de eucalipto	4.950	4.630
Astilla de eucalipto	4.800	4.500
Carbón de residuos agrícolas	6.400-7.100	6.100-6.800
Carbón vegetal	7.500-8.300	7.200-8.000
Biomasa de cardo seca	3.900	3.600
Pasto	4.300-4.600	4.000-4.300
Girasol	4.600-4.900	4.300-4.600
Maíz	4.550-4.600	4.250-4.300
Cascarilla de arroz	3.400-4.100	3.200-3.850
Cascarilla de café	3.400	3.200
Cáscara de coco	4.300-4.800	4.050-4.550
Bagazo de caña de azúcar	4.400	4.150
Ramas de algodón	4.750	4.500
Fuel-oil	10.150	9.450
Gasolina	11.200	10.500
Etanol de 96 (4% agua en volumen)	6.740	6.420
Metano	12.738	11.950
Propano	12.900	11.080
Butano (gas)	11.800	10.932

Nota: 1 kcal = 4,184 kJ.

Un concepto importante es la noción de PCI útil (PCI_u), y equivale al PCI del combustible menos el calor latente de evaporación del agua de humedad. Así, tomando un ejemplo de la tabla anterior, el PCI_u de madera de chopo con un 25% de humedad será:

$$PCI_u = 4.392 \cdot 0{,}75 - 600 \cdot 0{,}25 = 3.144 \text{ kcal/kg}$$

2.3.2. Densidad de la biomasa

Para valorizar la biomasa se tritura para el transporte y su introducción al horno; por ello es preciso distinguir entre:

Densidad a granel: Se determina por la relación entre el peso y el volumen de una masa de partículas razonablemente compactadas. Existe una subdivisión entre la densidad aireada, cuando las partículas son compactadas por gravedad, y la densidad empacada, cuando las partículas son sometidas a un período de vibración.

Densidad absoluta (real) o específica: Se define como la relación entre la masa de la partícula y el volumen ocupado por ella, por lo tanto, se calcula sin considerar el volumen ocupado por los poros.

La densidad aparente y la real (entre paréntesis), todos ellos en kg/m^3, de diversos materiales es:

- Carbón vegetal: 550 (1.400).
- Carbón mineral: 700 (1.400).
- Bagazo de caña: 200 (1.450).
- Cascarilla de arroz: 600 (1.400).

De los datos anteriores se deduce que la densidad aparente de la biomasa en general, y en este caso del carbón mineral, es la misma. Por otra parte, la densidad a granel de ciertos materiales, como sería el caso del bagazo, es tan pequeña que para que su uso sea atractivo como recurso energético, habría que aumentar la densidad.

2.3.3. Otras propiedades

En este apartado se resaltan ciertas propiedades, e inconvenientes, de uno de los derivados de la biomasa llamado a tener un papel descollante en los próximos años: el biodiésel.

- Como recurso primario, los aceites de las oleaginosas, tienen un contenido en aceite que varía en un amplio rango, del 10 al 15% en peso para el aceite de coco, hasta más de un 50%

para las almendras de palma. Los carbohidratos (principalmente polisacáridos), del 15 al 30% en peso. Proteínas: muy alto en el caso de la soja, hasta un 40% (cifra que justamente define a este producto como proteico), pero las oleaginosas tienen un contenido menor, entre el 15 y el 25%.

- Tienen la capacidad de participar en los enlaces de hidrógeno, haciéndoles más hidrosolubles que los hidrocarburos. Esta característica confiere al biocombustible una capacidad de ser 100% biodegradable.
- En el empleo como carburante se reducen notablemente los índices de contaminantes peligrosos: así los niveles de hidrocarburos poliaromáticos (cancerígenos) se reducen en un 75% y los de benzo(a)antracenos en un 50%.
- Como disolvente es incompatible con una serie de plásticos derivados del caucho natural.
- Tiene una escasa estabilidad oxidativa, teniendo una vida útil máxima de seis meses.

2.4. NOCIÓN DE BIORREFINERÍA

La utilización integral de la biomasa ha permitido el desarrollo de un concepto denominado biorrefinería, que se define como una instalación industrial que convierte y procesa la biomasa para transformarla en combustible, energía y productos químicos. De esta forma se establece un proceso análogo a las refinerías de petróleo, las cuales producen una múltiple variedad de productos a partir del petróleo. Las biorrefinerías industriales representan una estrategia integral para la utilización de la biomasa y la creación de una nueva actividad basada en ella.

La elaboración de productos diversos permite obtener ventajas comparativas sobre los procesos individuales, ya que aprovecha las etapas intermedias de la transformación, para maximizar el rendimiento de la biomasa que es ingresada al sistema. De esta forma una biorrefinería puede simultáneamente producir productos químicos, biocombustibles líquidos, electricidad y calor.

Un ejemplo esquemático de este concepto se muestra en la Figura 10.6.

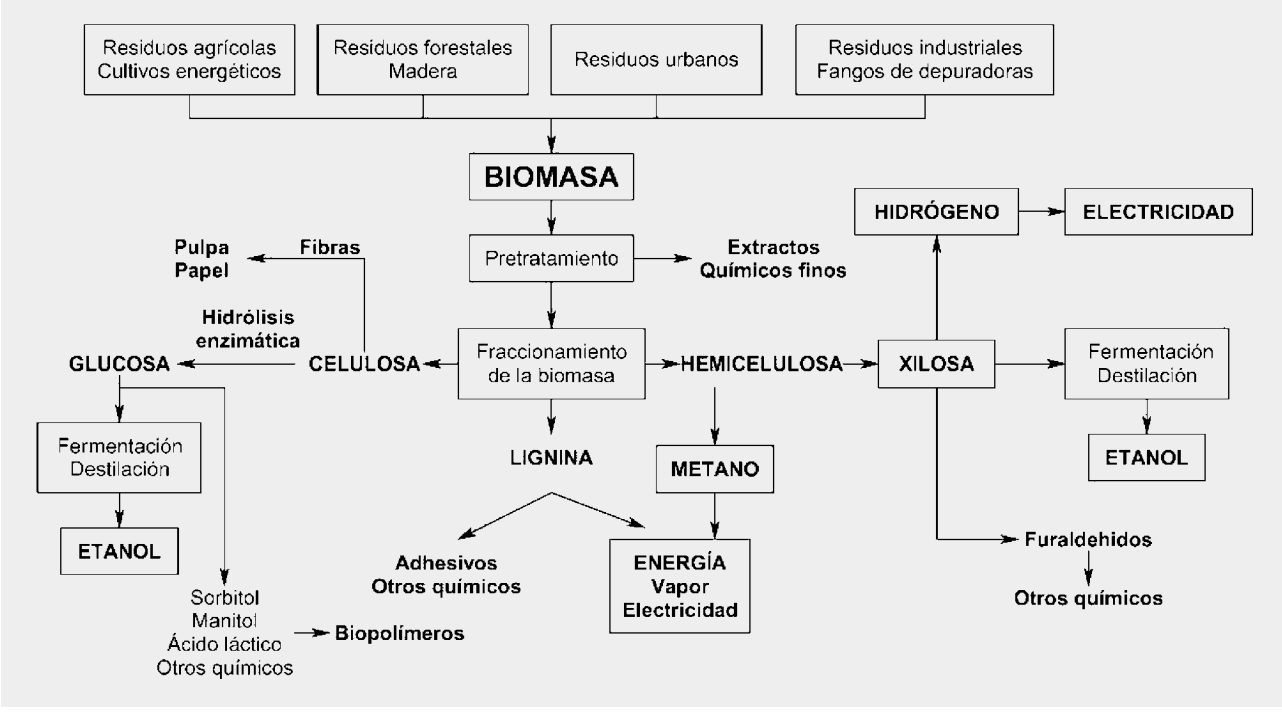


Figura 10.6. Esquema conceptual de una biorrefinería.

3. Estrategias para la valorización energética de la biomasa

El aprovechamiento energético de la biomasa se puede obtener mediante varios procesos de transformación de la energía. Según sea el destino que se busca dar a este aprovechamiento se tendrán distintas posibilidades técnicas para lograr un proceso que genere el producto deseado. En términos generales se pueden definir dos grandes grupos de procesos que permiten la obtención de energía a partir de materia orgánica. Los sistemas termoquímicos, que incluyen los procesos de incineración, pirólisis y gasificación y los sistemas bioquímicos que aprovechan la degradación natural de la biomasa para obtener un gas combustible.

En el DVD adjunto, en el punto 1, se muestra información sobre diversos sistemas de valorización energética de la biomasa.

En términos generales, una instalación para la generación de electricidad a partir de biomasa posee una secuencia de componentes que se puede resumir de la siguiente manera:

- *Sistema de recepción de biomasa:* La biomasa es conducida desde los lugares de origen hasta la instalación industrial de valorización, donde es almacenada y sometida a un pretratamiento para acondicionarla a las características requeridas por el proceso. Esta etapa incluye generalmente triturado y secado de la biomasa, y se efectúa en condiciones adecuadas de seguridad para prevenir la inflamación.
- *Sistema de alimentación de la biomasa:* Desde el lugar de almacenamiento la biomasa se traslada hasta un sistema de alimentación que la transporta internamente hasta el proceso de transformación y valorización.
- *Sistema de valorización:* La biomasa es sometida al proceso de transformación, en este caso con fines energéticos, a través de combustión, pirólisis, gasificación, digestión anaerobia u otro. De lo cual se obtiene generalmente energía calórica, o bien biocombustibles líquidos, sólidos o gaseosos.
- *Sistema de transformación de la energía:* Dependiendo del proceso será necesario, por ejemplo, para la obtención de energía eléctrica, una turbina de vapor, un motor de combustión o una turbina de gas, en el caso de la combustión, la gasificación y la digestión anaerobia, respectivamente.
- *Sistema de depuración de gases:* La instalación industrial deberá contar con un sistema de depuración de gases, para controlar emisiones a la atmósfera asociadas al proceso de transformación.

En el DVD adjunto, en el punto 2, se muestra información sobre sistemas de tratamiento de biomasa.

Adicionalmente, el proceso de valorización energética podrá contar con un sistema de almacenamiento de los productos y acondicionamiento para el traslado hacia otras instalaciones industriales, ya que los mecanismos utilizados pueden tener como finalidad la producción de biocombustibles para alimentar otras industrias.

La biomasa residual, y dependiendo de la composición química o la estructura, puede ser clasificada de acuerdo a su origen a partir de tres fuentes, la biomasa de origen homogéneo, la de origen no homogéneo y la heterogénea. Cada una de ellas puede seguir, a su vez, diferentes vías para su utilización como fuente energética.

En el caso de la biomasa homogénea estas pueden ser:

- Pretratamiento a base de hidrólisis o fermentación, para la obtención de un biocombustible líquido como el etanol. La obtención de energía a partir de la lignina y los residuos.
- Tratamientos de fraccionamiento para la obtención de extractos, hemicelulosa, celulosa y lignina.

En el caso de la biomasa no homogénea:

- Fraccionamiento a través de pirólisis, y la obtención de coque, gases combustibles y líquidos piroleñosos.
- Gasificación, a través de procesos biológicos, producción de biogás, o bien a través de procesos termoquímicos, para la obtención de gas de síntesis; en ambos casos se produce un biocombustible con alto poder calorífico, el cual es de fácil oxidación para la obtención de calor y energía. Otra alternativa es su uso para la síntesis de otros biocombustibles como los alcoholes.
- Combustión directa.

La biomasa heterogénea posee alternativas similares, ya que puede ser utilizada tanto para la gasificación como en la combustión directa.

La clave de todas las alternativas es la obtención de fracciones intermedias de biomasa con características homogéneas. Las oportunidades disponibles para efectuar la valorización energética de la biomasa pueden ser agrupadas de acuerdo al esquema presentado en la Tabla 10.5.

Tabla 10.5. Diferentes alternativas para la utilización de la biomasa como fuente energética.

Alternativa	Tipo de biomasa	Oportunidades
A	Homogénea	Transformar las plantas que utilizan, por ejemplo, fibras de madera, en biorrefinerías para producción de biocombustibles.
B	No homogénea	Fraccionar la biomasa en fracciones homogéneas funcionales.
C	Heterogénea	Convertir la biomasa en biocombustible homogéneo como el biogás.

En la alternativa A, para la utilización de la biomasa como fuente energética, es preciso transformar las actuales plantas de procesamiento de madera, en biorrefinerías, que serían capaces de producir productos específicos, como por ejemplo:

- Fibras.
- Carbohidratos solubles para la producción de biocombustibles y biopolímeros.
- Compuestos químicos derivados de la lignina y biocombustibles.
- Calor y energía para uso interno.
- Energía para vender a la red.

En el caso de las alternativas B y C, se debería utilizar biomasa residual como fuente de energía, la cual permite la aplicación de diferentes estrategias para la transformación de la biomasa en un biocombustible. Un ejemplo de esto es la producción de aceites de alto grado.

3.1. APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LA BIOMASA A TRAVÉS DE LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES LÍQUIDOS

La producción de biocombustibles líquidos permite la utilización de la energía proveniente de los residuos agrícolas y forestales, en el abastecimiento de motores a combustión, sustituyendo parte importante de los carburantes fósiles utilizados en la actualidad.

La Directiva de biocombustibles 2003/30/EC, de 8 de mayo de 2003, referente a la promoción del uso de biocombustibles para el transporte, establece el objetivo del 5,75% de biocarburantes en el sector del transporte en 2010, lo que supondría un consumo de 18,2 Mtep. En 2005 se produjeron 2,8 Mtep y siguiendo la progresión actual se estima una producción de 9,4 Mtep en 2010, por lo que los objetivos marcados parecen, en el caso de España, difíciles de cumplir.

Actualmente se han desarrollado dos principales productos de la transformación de biomasa en combustibles líquidos: los bioaceites carburantes y los bioalcoholes. Los primeros como sustituto del diésel y los segundos como sustituto de las gasolinas. Si bien en la práctica esta sustitución es parcial, ya que se mezcla en forma proporcional al combustible original, se alcanzan sustituciones de hasta un 20% en volumen.

Sus principales beneficios se asocian a la alternativa de los combustibles fósiles en un sector de la economía especialmente dependiente de estos productos, contribuyendo de esta forma a la disminución de los gases de efecto invernadero. Es importante recalcar los beneficios sociales asociados al establecimiento de una industria de biocombustibles líquidos y el cultivo de especies que abastezcan dicho mercado, ya que se produce un incentivo a la producción agrícola, sobre todo en países en vías de desarrollo dependientes de mercados externos donde una de las principales fuentes de empleo se ubica en los sectores rurales, disminuyendo además la dependencia energética de los sectores de consumo de petróleo.

La tendencia más universal parece que estriba en tomar el vegetal y extraer de él todas las sustancias valiosas que contenga, como vitaminas y antioxidantes, las semillas destinarlas a la producción de biodiésel y el resto, en términos de masa la gran mayoría, a energía. El caso de la uva es bien representativo en este sentido: una vez prensada se retira el líquido para elaborar el vino. El resto, mezcla de piel (holleja) y grano, se fermenta para extraer alcohol. Del material seco se separa el grano y la piel. Del grano se extrae, por disolvente, un aceite de excelente calidad y el grano resultante, junto a la piel, se destinan a la producción de energía.

Otro ejemplo de aprovechamiento lo constituye la valorización de la corteza y pulpas de naranjas, típico flujo residual de las fábricas de zumos de frutas. El desarrollo tecnológico elaborado por el Servicio

de Investigación Agrícola de Florida (EE UU) ha permitido poner en marcha una planta que generó, en 2007, 190.000 litros de bioetanol anuales. El Gobierno de la Comunidad Autónoma de Valencia (España), donde se generan 500.000 t/año de este residuo, piensa transformarlos en 37.500.000 litros de bioetanol. Trasformando estas cifras: cada tonelada de residuo puede producir entre 75 y 80 litros de bioetanol, que para coches de movilidad reducida (10.000 km/año), supondría proporcionar combustible para 25.000 automóviles. De esta manera, la sostenibilidad se mantiene como un parámetro crítico y pilar fundamental de la valorización integral.

Existen muchas formas de clasificar la biomasa. Una de ellas puede ser:

- *Residuos forestales:* resultantes de un proceso de producción de madera, podas de parques, restos de talas, etc. También es la producida espontáneamente en las tierras no cultivadas y que el hombre ha utilizado tradicionalmente para satisfacer sus necesidades (leñas).
- *Terrenos agrícolas degradados:* procedentes de espacios deforestados, degradados, quemados, donde todavía no están en condiciones de llevar a cabo una reforestación.
- *Residuos agrícolas:* liberados en la recolección y procesado de alimentos. Pajas, cultivos de bulbos, residuos de invernaderos y podas de árboles frutales.
- *Excedentes de terrenos agrícolas:* resultantes de la recolección una vez satisfechas las expectativas de alimentos y piensos.
- *Estiércoles:* o biomasa procedente de las explotaciones ganaderas.
- *Residuos orgánicos:* RSU, fangos de depuradora. Residuos generados después del procesado de materiales: envases, embalajes, residuos industriales de la industria de madera, papel, etc.

3.1.1. Aceites vegetales

Los aceites de origen vegetal pueden ser clasificados, en términos generales, en tres tipos de aceite:

- *Aceite bruto:* Obtenido por medio de técnicas industriales, como el prensado o mediante el uso de disolventes.
- *Aceite refinado:* El aceite sometido a procesos de limpieza o procesamientos posteriores, para la mejora de su calidad.
- *Aceite esterificado:* Resultado de la reacción química entre el aceite vegetal y un alcohol, que generalmente es el metanol, generando un aceite con mejores características para su uso con fines energéticos.

En el DVD adjunto, en el punto 3, se muestra información sobre sistemas de cogeneración con aceite.

Los bioaceites o aceites vegetales pueden ser utilizados con alta eficiencia en motores de combustión de inyección indirecta, ya que son más viscosos que el gasóleo tradicional. Además, pueden sustituir parcialmente el gasóleo en vehículos tradicionales, con lo que se facilita su uso.

Actualmente los bioaceites son sometidos a un proceso de esterificación, con lo que se hidrolizan los enlaces éster de los trigliceridos, se libera glicerina y cadenas de los ácidos grasos, que reaccionan posteriormente con un alcohol formando moléculas lineales que son mucho menos viscosas y por lo tanto facilitan su uso. Este tipo de carburante se denomina biodiésel.

Es de vital importancia conocer la presencia de ácidos grasos no saturados, ya que provocan inestabilidad en la reacción y además generan residuos que se depositan en inyectores, dificultando el paso del combustible y provocando que la combustión sea incompleta y que se produzca un aumento de gases de combustión.

Desde el punto de vista del rendimiento, la utilización de bioaceites conduce a rendimientos ligeramente por debajo de los combustibles fósiles tradicionales, por lo que hay factores de diseño de los motores que deben ser mejorados para aumentar la productividad. La esterificación del aceite puro permite solucionar una gran parte de los problemas que surgen al utilizarlo como combustible líquido.

Otra opción consiste en calentar el aceite vegetal puro para disminuir la viscosidad, de manera que los problemas asociados a esta condición permitan mejorar las prestaciones del combustible. La mezcla del aceite puro con gasóleo se puede hacer sin ningún tipo de modificación a los procesos, y es un proceso utilizado en la actualidad en ciertos países, como Alemania, sin inconvenientes.

La Tabla 10.6 muestra las características más importantes del bioaceite, comparado con un combustible fósil.

Tabla 10.6. Comparación de las características de biodiéseles con gas-oil. (Adaptación a partir de De Juana 2004 y Camps, 2002)

Características	Ester metílico de colza	Aceite de colza	Gas-oil Europa
Densidad a 20 °C, kg/l	0,880	0,916	0,835
Viscosidad 20 °C cSt	7,5	31,8	4,0
PCI (kJ/kg)	33.100	34.300	35.000
Azufre% en peso	0,002	0,0001	0,2
Numero de Cetano	47,8	32/36	51

Los antecedentes permiten establecer que el uso de aceites es una posibilidad real para la sustitución de los combustibles fósiles en los motores de automoción, pero hay consideraciones económicas que deben tenerse en cuenta, ya que el precio de los aceites vegetales se ha incrementado en los últimos años, además de los costos necesarios para el proceso de esterificación. La internalización de los beneficios ambientales asociados a estas tecnologías es una de las opciones que deben ser evaluadas para permitir la rentabilización de estos proyectos.

3.1.1.1. Proceso de esterificación

El proceso de esterificación es el mecanismo mediante el cual se lleva a cabo la transformación de los aceites vegetales para la producción del biodiésel. El aceite es un éster, que se hace reaccionar con un alcohol, usualmente metanol, obteniendo como productos la glicerina, y moléculas lineales formadas por los ésteres de los ácidos grasos con el alcohol, que al utilizar metanol se convierte en un metilester. El proceso es sencillo, necesitándose un catalizador para impulsar la reacción, que generalmente es el hidróxido potásico. En promedio, a partir de 1,05 toneladas de aceite y 0,11 toneladas de alcohol, se obtienen 1 tonelada de metilester, 0,023 toneladas de ácidos grasos y 0,1 toneladas de glicerina.

El proceso es presentado en la Figura 10.7.

3.1.1.2. Cultivos para la producción de bioaceites

Las principales fuentes utilizadas en países europeos para la obtención de aceites son la colza y el girasol. Ambas son plantas oleoginosas que contienen gran cantidad de aceites y son cultivados anualmente. Se desarrollan en la actualidad numerosas investigaciones para incorporar otras especies a la producción de bioaceites, mediante la selección de variedades con mayor productividad de aceite y menor costo de producción. En este sentido uno de los cultivos que se está desarrollando es el cardo (*Cynara cardunculus L.*) ya que posee una alta concentración de aceite y es un cultivo perenne con lo que se disminuyen sustancialmente los requerimientos de establecimiento de la plantación. El único inconveniente en la producción de los aceites, es la necesidad del proceso de esterificación, ya que aumentan los costos y requiere de instalaciones industriales, con la producción de un gran

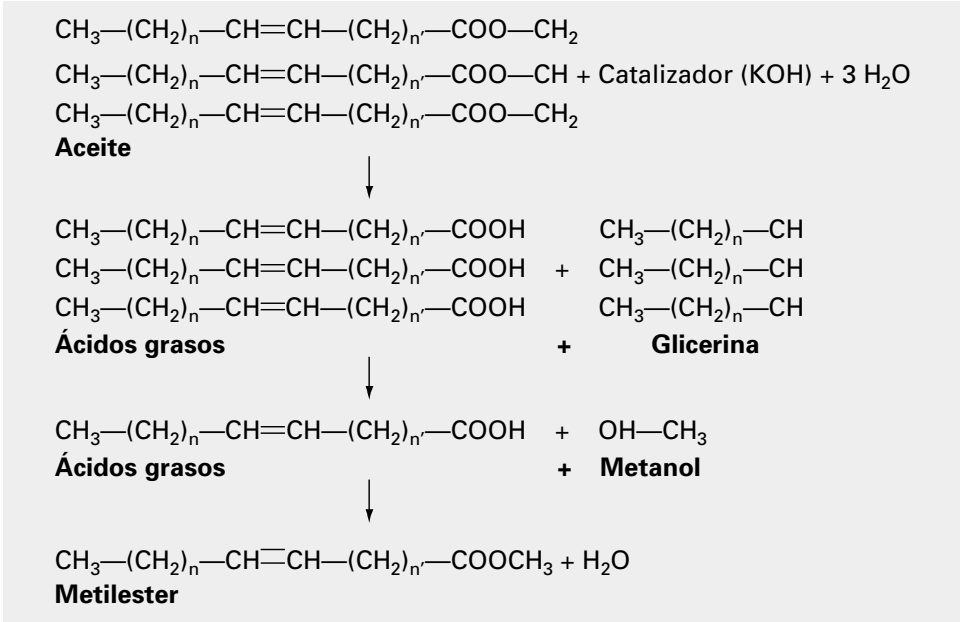


Figura 10.7. Proceso de esterificación con metanol.

volumen de glicerol residual. Por ello, es interesante plantear investigaciones tendentes a desarrollar motores que utilicen directamente el aceite, prescindiendo del proceso de esterificación. La productividad promedio de algunos de los cultivos más utilizados se presenta en la Tabla 10.7.

Tabla 10.7. Productividad de aceites en diferentes cultivos.

Cultivo	Contenido de aceite (% del peso total)	Producción de aceite (kg/ha)
Girasol	44	308
Colza	40	600
Cardo	24	360

3.1.1.3. DME

Es el éster más sencillo y es inocuo para el medio ambiente. Actualmente se usa principalmente como propelente y se perfila como uno de los combustibles perfectos para sustituir al diésel en motores de combustión interna cambiando el sistema de inyección. Es un gas a temperatura ambiente que licua a –25 ℃ y puede ser fácilmente almacenado en tanques a presión y usar la infraestructura propia de los GLP (Gas Líquido del Petróleo) y tiene un mayor índice de cetano que el gasoil y el metanol. Su combustión no produce carbonilla ni SO_2 y poco NO_x. Esto lo convierte en un perfecto sustituto para el gas natural en turbinas, cocinas y hornos industriales. Se obtiene a partir de la deshidratación del metanol, por lo que puede ser producido a partir de diferentes fuentes, fósiles como carbón o gas natural, o biomasa. El carbón y la biomasa se gasifican para obtener el gas de síntesis a partir del que se produce el metanol. Actualmente se ha desarrollado un proceso que combina la síntesis de metanol a partir del gas de síntesis con la deshidratación.

El DME, aunque no para uso común en vehículos, está teniendo mucha aceptación como vector energético equivalente al GLP, especialmente en países emergentes con grandes reservas de carbón o gas, como China o Irán, que desean evitar el exceso de contaminación sin modificar sus usos habituales.

3.1.2. Alcoholes

Otro de los procesos existentes para la generación de combustibles a partir de la biomasa es la obtención de alcoholes, como el etanol, a base del fraccionamiento de la lignocelulosa.

En la actualidad hay programas de producción de alcoholes, para su uso como combustible, en países como Brasil, donde se producen anualmente más de 10 millones de metros cúbicos de etanol para su utilización en motores de automoción. Su uso puede ser puro, o bien en mezclas de entre 5 y 10% con gasolina normal, alcanzando incluso un 20% de sustitución en Brasil, donde se han introducido los denominados motores flex, que indistintamente utilizan cualquier proporción de gasolina y alcohol.

En el caso de alcohol puro se requiere de motores especiales, los cuales requieren una serie de adecuaciones para permitir la combustión del alcohol, principalmente por la mayor presión que deben soportar las válvulas, al poseer una mayor relación de compresión, además de la utilización de materiales que no sean atacados por el alcohol.

La obtención del alcohol de forma industrial se puede realizar a partir de tres sustratos diferentes:

- Biomasa azucarada, es decir que contenga azúcares, por ejemplo glucosa, sacarosa o fructosa, como los cultivos de caña de azúcar o sorgo.
- Biomasa almidonada, con polisacáridos de tipo almidón, como por ejemplo la proveniente de cereales o tubérculos.
- Biomasa celulósica, a través del fraccionamiento de lignocelulosa, como por ejemplo la madera.

Los tres sustratos siguen un proceso similar, una fermentación inicial que permite la obtención de un alcohol de baja graduación alcohólica, y luego una destilación para concentrar el alcohol.

El método más sencillo es la conversión a partir de biomasa azucarada, de donde se extrae fácilmente un jugo rico en azúcares, que es fermentado hasta obtener un alcohol de bajo grado alcohólico, con un alto contenido de agua, lo cual lo hace inadecuado para su uso como combustible. En el caso del sustrato almidonado es necesario convertir primeramente el almidón en azúcar lo cual hace más larga la síntesis completa (este proceso se realiza a través de una hidrólisis convencional). En el caso de biomasa celulósica, la síntesis se lleva a cabo por medio de una hidrólisis fuerte, que permite la obtención de un sustrato fermentable. El proceso a partir de la glucosa es el que sigue:

1. *Fermentación*

Cuya expresión química simplificada se reduce a la siguiente fórmula:

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2\ C_2H_5OH + 2\ CO_2$$

Esta fermentación se realiza mediante la adición de levaduras, a una temperatura de entre 29 y 35 ℃ a una presión de 48 a 72 bar. A partir de 100 gramos de glucosa se obtienen 51,1 gramos de etanol y 48,8 gramos de CO_2. Actualmente el proceso de fermentación se realiza en fermentadores anaeróbios continuos.

2. *Destilación*

El subproducto generado en la etapa anterior, con un grado alcohólico de entre 10 y 15º, se concentra hasta obtener un alcohol denominado alcohol deshidratado, que contiene 4 a 5% de agua o bien se puede llegar a un producto denominado alcohol absoluto, que posee una cantidad menor al 0,5% de agua.

Una alternativa para la transformación de la lignocelulosa es la gasificación, que será explicada en un apartado posterior, obteniéndose un gas a partir del cual es posible sintetizar otros combustibles, incluido el etanol.

3.1.2.1. Cultivos utilizados para la producción de alcoholes

Existe una serie de cultivos agrícolas tradicionales que permiten la obtención de alcoholes para su utilización como combustible. Entre ellos la remolacha y la caña de azúcar que son los que más ampliamente se han utilizado con estos fines. Existiendo además cultivos como cereales o el maíz que también poseen un potencial elevado para su transformación en biocombustibles.

La remolacha posee en la actualidad un rendimiento medio de 60 toneladas por hectárea, de donde es posible obtener aproximadamente 6.000 litros de etanol. Una estimación general permite concluir que para la producción de un litro de etanol se requiere gastar un total de 4,22 Mcal de combustible primario. Los rendimientos de otros cultivos se muestran en la Tabla 10.8.

Tabla 10.8. Rendimientos de etanol a partir de diferentes cultivos.

Cultivo	Productividad del cultivo (toneladas/ha)	Obtención de etanol (litros/ha)
Remolacha	60	6.000
Sorgo azucarero (tallos)	90	6.000
Sorgo azucarero (grano)	35	3.000
Trigo	2,5	877
Maíz	10	3.700
Caña de azúcar	50	3.500
Madera	20	3.200
Residuos de poda	2,3-4,0	700-1.200
Patata (tubérculo)	62,5	5.000

3.1.2.2. Empleo de alcoholes como disolventes para la obtención de pastas celulósicas

Algunos procesos de pasteado emplean como disolventes orgánicos metanol, etanol, propanol, glicoles, etc., para la desintegración de la lignina, proceso denominado *organosolv*. Las maderas que mejor se adaptan a este proceso son las denominadas frondosas, como el eucalipto. Las maderas coníferas presentan un menor grado de deslignificación, requiriendo temperaturas de cocción más elevadas y la presencia de aditivos.

Las materias primas alternativas a las maderas tradicionales, suelen ser más fáciles de tratar que las maderas convencionales, aunque en algunos casos presentan inconvenientes debido al elevado contenido de sílice que afecta tanto a la calidad de la pasta como a la recuperación del disolvente. En los últimos años, numerosos investigadores han ensayado las posibilidades de deslignificación de materias alternativas a la típica madera como:

- *Bagazo de caña de azúcar.* Se han obtenido resultados de deslignificación comparables a las pastas convencionales de maderas frondosas.
- *Pajas.* Se han obtenido buenos valores, si bien la lignina residual presenta valores elevados. Con pajas de arroz se han conseguido pastas «al etanol» con elevados rendimientos. La paja de cáñamo, al igual que la paja de trigo, son muy sensibles al refinado.
- *Hierba elefante* (*Miscanthus sinensis*), de elevada producción (30-35 t/ha y año de materia seca), se deslignifica bien con etanol/sosa.
- *El carrizo* (*Phalaris arundinacea*), con rendimientos de 4 a 8 t/ha y año de materia seca, es una planta especialmente valorada en los países nórdicos donde se la considera una importante fuente sostenible de fibras cortas para la industria papelera. Las hojas de este vegetal se han de eliminar previamente mediante un fraccionamiento mecánico en seco, del que se obtienen rechazos que pueden ser valorizados para la producción de biodiésel.

- *Podas de olivo.* Recurso muy abundante en los países mediterráneos. Sus pastas «al etanol» consiguen buenos resultados de deslignificación. Se puede obtener una calidad de papel aceptable con un coste energético menor que en el caso del eucalipto.
- *Podas de tagasaste,* leguminosa arbustiva endémica en las islas Canarias (España), de la familia *Fabaceae (Genistae).* Es un vegetal empleado para la recuperación de suelos degradados, dado su carácter leguminoso. Se debe podar para que rebrote, ya que, básicamente, se usa como forraje.
- *Podas de vid,* muy abundante en España. Los rendimientos de la deslignificación no son muy elevados.

A primeros de 2007, durante los I Encuentros de Energía, las autoridades del Gobierno regional Valenciano (España) presentaron un plan para sacar valor añadido a las 190.000 hectáreas destinadas al cultivo de la naranja, a partir del alcohol que se puede obtener por el tratamiento sobre la pulpa y la corteza de los cítricos.

3.2. OBTENCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES A TRAVÉS DE PROCESOS TERMOQUÍMICOS

A diferencia de los procesos bioquímicos los procesos termoquímicos se realizan a partir de la utilización de calor como fuente de transformación. Dependiendo de las condiciones en que dichos procesos se llevan a cabo es posible identificar la pirólisis, la gasificación y la combustión directa. Dada la importancia de este último proceso, en la valorización energética de biomasa, será explicado en forma más extensa.

La valorización energética de la biomasa a través de procesos termoquímicos permite en el caso de la pirólisis y la gasificación, la obtención de un biocombustible con propiedades homogéneas, independiente de las características de la biomasa inicial. Lo cual le confiere una gran versatilidad en el uso y aplicación a procesos industriales convencionales.

3.2.1. Pirólisis de la biomasa

La pirólisis se puede definir como la descomposición térmica de un material en ausencia de oxígeno o cualquier otro reactante. En este caso la biomasa es craqueada a una temperatura que oscila alrededor de 500 ℃. Esta descomposición se produce a través de una serie compleja de reacciones químicas y de procesos de transferencia de materia y calor. La pirólisis también aparece como paso previo a la gasificación y la combustión; es un proceso utilizado desde hace mucho tiempo para producir carbón vegetal. Esquemáticamente corresponde al croquis de la Figura 10.8.

La pirólisis consigue la recuperación energética de residuos biomásicos, con un bajo costo, permitiendo la obtención de biocombustibles gaseosos, líquidos o sólidos homogéneos. Estos biocombustibles pueden ser utilizados luego en procesos de gasificación o combustión para la producción de electricidad o vapor industrial. De la misma forma es un proceso que se utiliza para la recuperación de materias primas contenidos en productos.

Se puede considerar que la pirólisis comienza en torno a los 250 ℃, llegando a ser prácticamente completa en torno a los 500 ℃, aunque ello es función del tiempo de residencia del residuo en el reactor. Permite la producción de diversos productos en función de la tecnología utilizada y el tratamiento posterior que se haga de ellos, dando lugar a diversos usos y aplicaciones de estos productos generados en este proceso. Las reacciones propias de la pirólisis permiten la formación de productos primarios, entre los que se encuentran:

- Compuestos gaseosos, principalmente CO, CO_2, CH_4, C_2H_6 y pequeñas cantidades de hidrocarburos ligeros.
- Compuestos líquidos entre los cuales se destacan las cetonas, ácido acético y compuestos aromáticos (estas fases se hallan en fase vapor a la temperatura del proceso que luego condensan durante el enfriamiento).
- El residuo carbonoso de la pirólisis, coque, conocido como «char» que puede ser utilizado como combustible o para la producción de carbón activo.

En términos generales el proceso de pirólisis posee las siguientes etapas o fases:

- *Primera fase.* Endotérmica, llevada a cabo a temperaturas inferiores a 200 ℃; la biomasa va perdiendo la humedad, se desprende vapor de agua, algo de metanol y ácido acético.
- *Segunda fase.* Es también endotérmica, realizada a temperaturas de entre 200 ℃ y 280 ℃. Se produce la precarbonización de la biomasa, generando algunos compuestos líquidos, y gaseosos (principalmente jugo piroleñoso y CO_2, respectivamente).

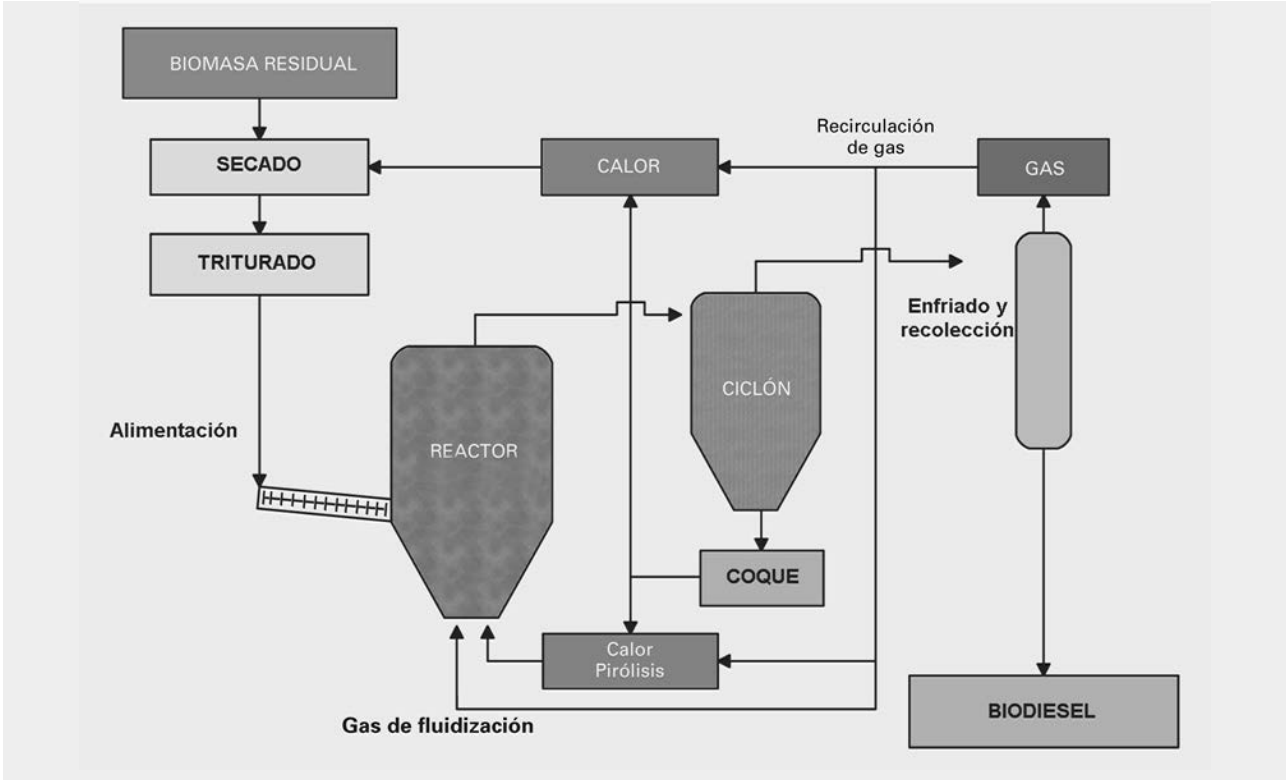


Figura 10.8. Ciclo de pirólisis de biomasa.

- *Tercera fase.* Es exotérmica, llevada a cabo entre los 280 ℃ y los 500 ℃. Se forman algunos alquitranes ligeros y se incrementa la producción de líquidos piroleñosos, con un mayor contenido de ácidos y aldehídos fórmicos. Además se generan una cantidad importante de gases combustibles como CO, CH_4 y H_2.
- *Cuarta fase.* Se desarrolla sobre los 500 ℃, también exotérmica. Se siguen originando compuestos volátiles, quedando un residuo carbonoso y generándose gran proporción de H_2, CO y CO_2.

En términos de eficiencia, un proceso como el descrito, permite a partir de 1.000 kilogramos de madera, la obtención de, aproximadamente, 330 kilos de carbón, 110 kilos de alquitranes, 360 kilos de líquido piroleñoso y 200 kilos de gas.

Los procesos pirolíticos pueden ser optimizados para aumentar la proporción de fracción líquida, a través de la llamada pirólisis flash. Este líquido puede ser utilizado como combustible o como precursor de otros compuestos químicos.

Dependiendo de las condiciones físicas en que se efectúe el proceso de pirólisis, se pueden diferenciar distintos tipos de procesos, que a su vez poseen una serie de parámetros que determinan los productos obtenidos en cada proceso. Así, aspectos como la temperatura o la presión pueden tener una gran importancia para determinar los productos que se pretende obtener. La Tabla 10.9 establece un resumen de los principales procesos que se utilizan.

La pirólisis flash, llevada a 1.000 ℃ en menos de un segundo, tiene la ventaja de asegurar una gasificación casi total de la biomasa, aunque la gasificación total puede obtenerse también mediante una oxidación parcial de los productos no gaseosos de la pirólisis.

La pirólisis se utiliza, con frecuencia, como complemento de otros procesos como la incineración, la gasificación o la digestión anaeróbia, por ello es posible situarla en el contexto que se muestra en la Figura 10.9, a través de la cual es posible establecer las vías de aprovechamiento de la biomasa residual para su valorización energética.

- *Ventajas, generales, de la pirólisis*
  - Muy baja emisión de partículas.
  - Posibilidad de aplicación al tratamiento de suelos contaminados.

Tabla 10.9. Características de los diferentes procesos de pirólisis

Pirólisis	Tiempo residencia	Velocidad calentamiento	Presión (bar)	Temperatura máx (°C)	Principal producto
Carbonización	Horas-días	Muy baja	1	400	Sólido
Convencional	5-30 min	Baja	1	600	Gas líq. y sólido
Fast	0,5-5 seg	Muy Alta	1	650	Líquido
Flash-líquido	<1 seg	Alta	1	<650	Líquido
Flash-gas	<1 seg	Alta	1	>650	Gas
Ultra	<0,5 seg	Muy alta	1	1.000	Gas
Vacío	2-30 seg	Media	<0,1	400	Líquido

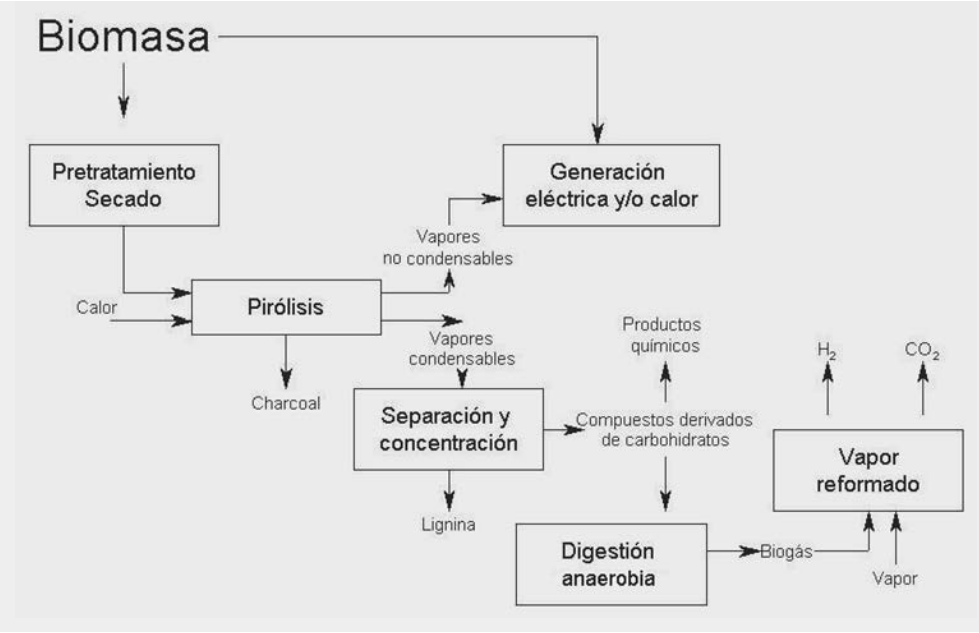


Figura 10.9. Diagrama de utilización de la biomasa.

- *Desventajas, generales, de la pirólisis*
  - Generación de coque de difícil reutilización.
  - Posibilidad de formación de productos tóxicos intermedios.

3.2.2. Obtención de biocombustibles a través de la gasificación

La gasificación es un proceso similar a la pirólisis, con la diferencia que debe existir la presencia de una cantidad controlada de agentes oxidantes. Este oxidante, que puede ser aire, oxígeno o vapor de agua, reacciona con el residuo carbonoso generado en la descomposición térmica de la biomasa generando un gas con propiedades energéticas que dependen del proceso utilizado y del agente oxidante. De esta forma las técnicas de gasificación permiten la obtención de un biocombustible gaseoso homogéneo, a partir de la transformación de biomasa de origen heterogéneo.

El proceso básico bajo el cual se desarrolla la gasificación es la interacción de vapor a una temperatura elevada, oxígeno, u otro agente oxidante, y biomasa sólida. Dichas reacciones no ocurren con facilidad ya que requiere temperaturas elevadas para que se lleven a cabo, alcanzado temperaturas superiores a 1.000 ℃ y presiones que superan hasta 30 veces la presión atmosférica (según la tecnología empleada). Un resumen del proceso es el siguiente:

- Durante la primera etapa se liberan gases volátiles desde la biomasa sólida, formándose residualmente coque. Ambos subproductos reaccionan luego con el vapor y el agente oxidante, formando inicialmente un gas que es mezcla de CO e H_2, con alguna proporción de metano, hidrocarburos y alquitranes.

- El gas obtenido debe ser sometido a procesos de refinamiento y acondicionamiento para la obtención de un gas limpio.

La utilización de otros agentes oxidantes, como el aire, permite la obtención de un gas con menor poder calorífico, pero a un costo varias veces menor si se compara con la utilización de oxígeno puro, que si bien permite la obtención de un gas de alto poder calorífico; requiere de inversiones adicionales para su producción, lo cual solo se justificaría en instalaciones industriales de gran envergadura.

La Tabla 10.10 muestra una estimación de los resultados que se obtendrían al utilizar cada uno de estos gases oxidantes.

Existe una variedad amplia de reactores que se utilizan para los procesos de gasificación de biomasa. Su elección depende de varios factores, como pueden ser la granulometría del residuo, la humedad de éste, o la limpieza del gas requerida. Los principales reactores utilizados son:

- *Lecho fijo:* Donde es posible distinguir los denominados a contra corriente (*updraft*) y corriente paralela (*downdraft*).
- *Lecho fluidizado:* Donde se puede distinguir los sistemas denominados lecho burbujeante y circulante.

El proceso de gasificación posee varias ventajas. Entre las principales cabe mencionar:

- Versatilidad en la valorización del residuo, ya que se puede aprovechar la energía que contiene en forma de calor, electricidad o como gas de síntesis para la obtención de productos químicos.
- Buen rendimiento eléctrico, en el caso de que esa sea la vía deseada para el aprovechamiento del residuo. Los rendimientos totales permiten la obtención de 1 kWh de energía a partir de, aproximadamente, 1 kilogramo de biomasa.
- Menor impacto ambiental.

La principal diferencia de la gasificación con la incineración es que en la obtención del gas de síntesis se realiza una oxidación parcial, en cambio la incineración realiza una oxidación completa de la biomasa. El gas de síntesis es de bajo costo y flexible a múltiples usos. El proceso de gasificación posee similitudes importantes con el proceso de obtención de biogás, ya que ambos permiten la obtención de un gas de moderado poder calorífico a partir de biomasa. Esquemáticamente, la comparación de dichos procesos se muestra en la Figura 10.10.

3.2.2.1. Diversos tipos de gasificación para la biomasa

La biomasa se puede gasificar con diversas tecnologías de gasificación que, básicamente, se diferencian por el tipo de reactor. La práctica totalidad de los gasificadores existentes pertenecen a alguno de los siguientes tipos descritos a continuación.

- *Lecho descendente o fijo:* Es la técnica más antigua y la que cuenta con mayor número de instalaciones industriales, principalmente aplicadas al carbón. Se puede usar tanto con aire solo, como con oxígeno y vapor de agua, que son introducidos por la parte inferior en contracorriente con el sólido que se alimenta por la cabeza del gasificador. La extracción de cenizas suele hacerse por la parte inferior del lecho. El sólido requiere un troceado y un cribado previo para evitar la alimentación de partículas demasiado finas que pudieran ser arrastrados por la corriente gaseosa. La eficiencia del sistema es relativamente bueno pero los gases contienen una elevada cantidad de alquitranes.
- *Lecho fluidizado:* Son gasificadores de construcción más sencilla que los de lecho fijo. El sólido se alimenta con un tamaño más fino que en el caso anterior, inyectándose el agente ga-

Tabla 10.10. Características de los gases obtenidos por la gasificación de biomasa. (Adaptación a partir de Camps 2002)

Gas oxidante	Contenido energético del gas obtenido	Principales usos del gas de síntesis
Aire	< 6 MJ/Nm^3	Quemadores de caldera o turbinas de gas.
Oxígeno	10-20 MJ/Nm^3	Gas de síntesis para la producción de metanol, gasolinas o amoniaco.
Vapor de agua + Oxígeno	10-20 MJ/Nm^3	Gas de síntesis para la producción de metanol, gasolinas o amoniaco.

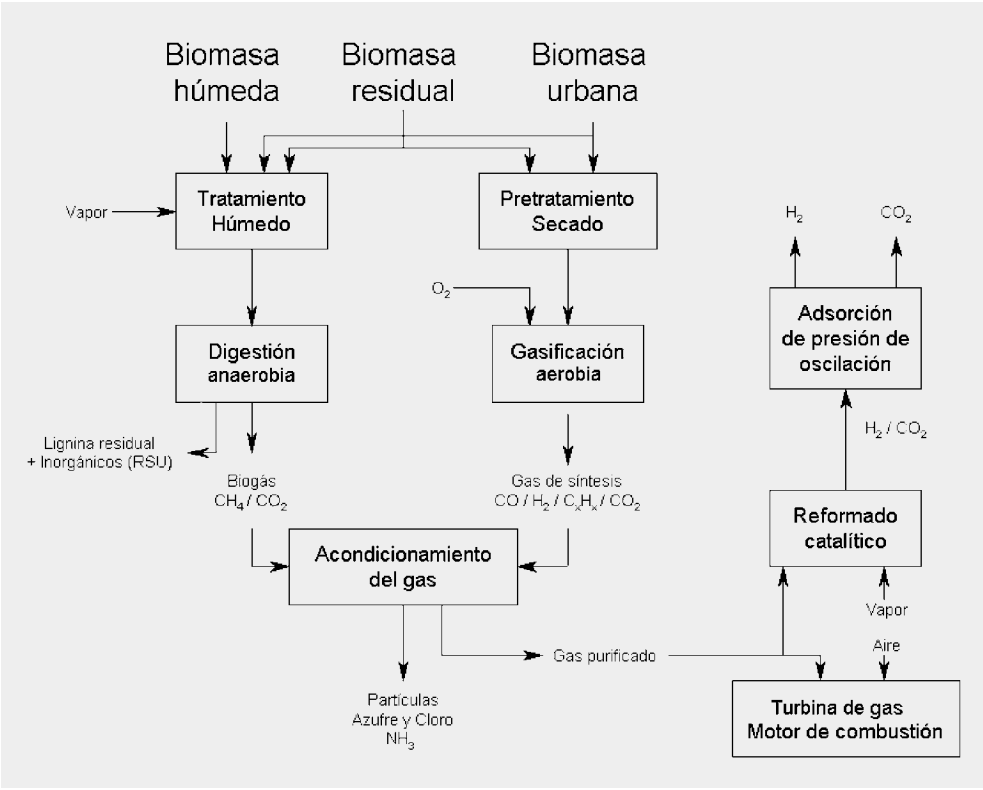


Figura 10.10. Producción de gas de síntesis, biogás e hidrógeno a partir de biomasa.

sificante por la parte inferior. La reacción tiene lugar con el sólido suspendido en la corriente gaseosa, lo que facilita el contacto entre ambas frases. La extracción de las cenizas suele hacerse por el fondo.

- *Corriente de arrastre:* El sólido finamente pulverizado es introducido en el reactor donde una corriente gaseosa lo arrastra, produciéndose la gasificación de modo casi instantáneo. La temperatura de reacción es elevada, lo que evita la formación de impurezas en el gas. La escoria fundida suele extraerse por la parte inferior.

3.3. APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LOS RESIDUOS A TRAVÉS DE LA COMBUSTIÓN O INCINERACIÓN

El proceso de combustión en exceso de aire o incineración es el método de aprovechamiento energético de la biomasa más antiguo y ampliamente utilizado. Es una reacción de oxidación donde el oxígeno presente en el aire actúa como elemento oxidante. La oxidación de la biomasa es un proceso altamente exotérmico que permite la autoalimentación para proseguir la reacción sin apoyo externo de energía. Esta reacción entrega calor y una serie de productos de la combustión. Se puede representar mediante la siguiente expresión general:

$$C_xO_yH_zS_vN_u + O(aire) \rightarrow CO_2 + H_2O + SO_x + NO_x$$

Por lo general, la materia vegetal posee alto porcentaje de humedad, en muchas ocasiones dicha cantidad es superior al peso seco de la materia, lo cual hace imprescindible la adecuación de la biomasa a niveles que aseguren la autocombustión.

Hay diversas técnicas para llevar a cabo la combustión de la biomasa. Existe un amplio desarrollo de equipos y sistemas que permiten la obtención de altos niveles de eficiencia para la producción de electricidad y, por lo tanto, diversos autores coinciden en que dado el desarrollado estado tecnológico en que se encuentra dicha investigación es difícil obtener mejoras sustanciales en dichos procesos. Las técnicas más utilizadas son la combustión en parrilla, la combustión en horno rotatorio y la combustión en lecho fluidizado. Un sistema completo de generación de electricidad a partir de combustión de biomasa se describe, en términos generales, por la siguiente secuencia de procesos y componentes:

- Sistema de alimentación de biocombustibles.
- Sistema de parrilla o lecho fluidizado.

- Sistema de entrada de aire para la combustión.
- Sistema de intercambio de calor con el ciclo vapor-agua.
- Sistema de depuración de gases.
- Sistema de retirada de las cenizas.

En el DVD adjunto, en el punto 4, se muestra información sobre sistemas de combustión y quemadores de baja generación de NO_x.

3.3.1. Descripción del proceso de incineración de biomasa

Sistema de alimentación

La biomasa es almacenada y acondicionada en silos diseñados especialmente para esta labor, cuidando la prevención de incendios y preparándolo para su introducción en el horno. La biomasa, una vez que ha sido sometida a un pretratamiento, se conduce hacia el sistema de combustión a través de cintas transportadoras cubiertas que evitan el contacto con elementos externos. Este sistema alimentador continuo deposita la biomasa en el interior del horno para iniciar el proceso de combustión.

Combustión en parrilla

La combustión en parrilla es el proceso tradicional de valorización energética de la biomasa. Existe en la actualidad un amplio desarrollo, y en el mercado hay disponibles equipos a precios competitivos para su uso con fines energéticos a nivel industrial. Este proceso consiste básicamente en un hogar recubierto de material refractario y aislante en el que se introduce el combustible sólido y el comburente para producir el proceso de combustión. El aire, que actúa de comburente, en combinación con la temperatura produce la gasificación de los sólidos y luego la oxidación de los gases resultantes del proceso. Es preciso distinguir entre el aire que actúa en primera etapa (generalmente por debajo la parrilla), denominado aire primario, que lleva a cabo las primeras reacciones (mayoritariamente de pirólisis y de gasificación, naturalmente también las hay de oxidación) y aire secundario, añadido posteriormente que permite la oxidación completa. El aire secundario representa alrededor del 65-80% de las necesidades de aire total del proceso, lo que depende finalmente de la proporción total de carbono presente en la biomasa utilizada. Es necesario determinar una relación de aire que permita disminuir las emisiones, ya que un exceso de aire supone un mayor volumen de gases que deben ser tratados después de la caldera.

El inicio de la combustión debe ser auxiliado de forma externa, luego la energía liberada permite una sustentación del proceso. Dependiendo de la posición del combustible, de las entradas de aire y del flujo de los gases de combustión se pueden diferenciar tres tipos de hornos que se representan en la Figura 10.11.

En el sistema de combustión ascendente, el aire primario (P) y el secundario (S) penetran por la parte inferior. En el diseño hay que procurar que la bóveda del horno, que a la vez hace de conducto de evacuación de gases, retenga a éstos de manera que el hogar se ponga incandescente.

El sistema de combustión horizontal, o inclinado, es el más usado para diseños de media y alta potencia. El aire primario penetra por el fondo (bajo la pa-

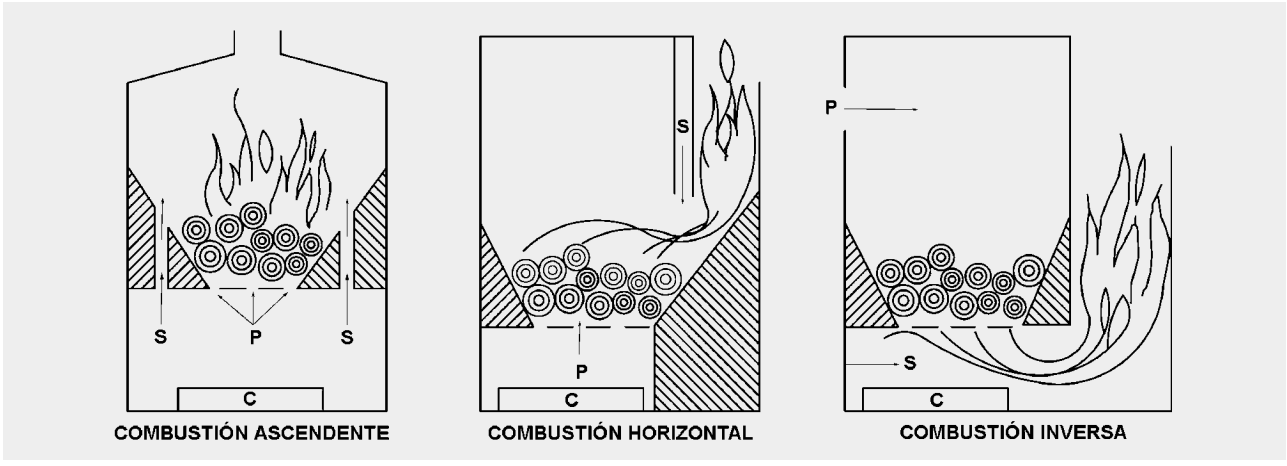


Figura 10.11. Diferentes hornos de combustión de parrilla.

rrilla) y el secundario se añade más adelante, a veces precalentado por su contacto con la bóveda.

El tipo invertido es un sistema poco empleado para las aplicaciones de conversión energética.

El proceso de combustión comienza con el depósito del combustible en las parrillas, las cuales pueden ser colocadas de manera horizontal o bien con una leve inclinación, lo cual permite una mayor versatilidad para el uso de distintos tipos de biocombustibles. Sobre estas parrillas el combustible se desliza, produciéndose procesos de secado, volatilización y combustión, los que se dan de manera escalonada, facilitando la regulación del proceso. Si el proceso genera muchas cenizas, por las características propias del combustible (alta proporción de inertes en su composición) el uso de parrillas móviles facilita la limpieza y evita la formación de escorias y de esta manera la saturación de los pasos de la parrilla.

Combustión en lecho fluidizado

Una segunda alternativa para llevar a cabo la combustión de la biomasa es la utilización de un sistema de lecho fluidizado, que consiste en un reactor en cuya parte inferior se deposita un material granular de naturaleza inerte, comúnmente arena de sílice, que es calentado con la ayuda de combustible auxiliar, hasta unos 650 ℃, obteniéndose un lecho a una temperatura elevada que recibe, por la parte inferior del reactor, aire que permite el movimiento de este lecho, y aporta el oxígeno necesario para la combustión. El combustible es depositado por la parte superior del reactor, adquiriendo rápidamente el calor necesario para su combustión, facilitado por el mayor contacto que es posible por el movimiento del lecho. El aire secundario necesario para llevar a cabo la oxidación es inyectado en la denominada zona de oxidación o cámara de oxidación.

Algunos modelos desarrollados para la combustión de la biomasa bajo este sistema presentan de forma independiente cada uno de los componentes, es decir: reactor de lecho fluidizado, cámara de oxidación y cámara de postcombustión.

Se distinguen principalmente dos tipos de lechos fluidizados:

- *Lecho fluidizado burbujeante:* presenta bajas velocidades de fluidización del aire, es una fluidización en fase densa.
- *Lecho fluidizado circulante:* elevadas velocidades de fluidización por lo que hay gran arrastre de sólidos que se pueden reciclar mediante un ciclón.

La utilización de tecnología de lecho fluidizado requiere necesariamente que el combustible que es utilizado sea sometido a un pretratamiento generalmente para homogenizar su tamaño, ya que se comportará dentro del reactor de manera similar a un fluido. El tamaño del combustible guarda relación directa con la calidad de la combustión, ya que a mayor grado de micronización, mejor rendimiento del proceso. El proceso realizado en lecho fluidizado conlleva unas ventajas que es necesario mencionar:

- Admite una variedad amplia de combustibles, ya que controlando la velocidad de entrada de aire se pueden obtener la fluidización de partículas de tamaño y densidades diversas.
- Hay una alta transferencia de calor, lo que permite instalar un intercambiador de calor dentro del sistema de lecho fluidizado. A la vez, este es un sistema para mantener la temperatura por debajo del valor de consigna.
- Si la temperatura de trabajo se mantiene dentro de unos límites, las cenizas no se fundirán. Por lo que tampoco se forman escorias en los tubos del intercambiador y en las paredes de la caldera.
- Menor exceso de aire de combustión, ya que hay una mayor superficie de contacto entre combustible y comburente y por lo tanto un mayor rendimiento.
- La temperatura es uniforme dentro de todo el lecho, lo que facilita el control y evita que el nitrógeno del aire se oxide. (La temperatura del lecho debe mantenerse a un nivel inferior a 950 ℃ para evitar la fusión del ácido. A esta temperatura el nitrógeno es completamente inerte).
- Se pueden introducir absorbentes que eliminen en el lecho mismo el SO_2.

Uno de los inconvenientes de esta tecnología es el pretratamiento a que hay que someter los combustibles, y por lo tanto se debe disponer de una solución en particular para cada tipo de biomasa utilizada. Un sistema homogenizador podría solucionar este problema, en el caso de una biomasa heterogénea, mediante el astillado, secado, molido y posterior secado y paletizado del combustible. A pesar de ello el hecho de que el sistema de lecho fluidizado exija un determinado grado de pretratamiento no es una limitación, debido a las ventajas, señaladas anteriormente, que proporciona. Un ejemplo del funcionamiento de este tipo de reactor aparece en la Figura 10.12.

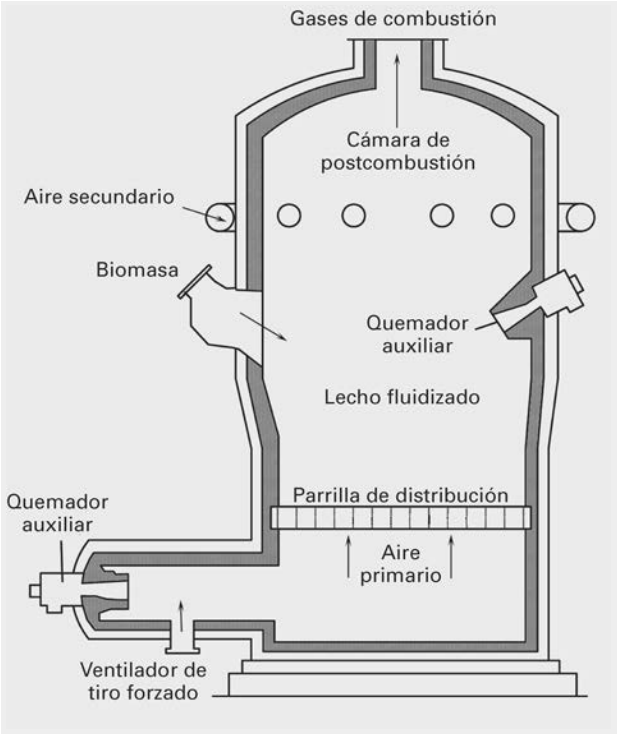


Figura 10.12. Sistema de combustión de lecho fluidizado.

En el DVD adjunto, en el punto 5, se muestra información sobre los lechos circulantes y burbujeantes.

Recuperación de calor

El calor producido por la combustión puede ser recuperado de manera integrada o bien por una unidad separada al horno de combustión. Para esto una caldera absorbe el calor contenido en los gases de combustión y lo traspasa al agua que pasa a una forma gaseosa y aumenta su entalpía a una presión determinada. El vapor se separa de la fase acuosa y fluye por tubos recalentadores donde aumenta su temperatura hasta los valores deseados. La combustión de la biomasa puede conseguir temperaturas de recalentamiento de vapor de 525 ℃ mientras los residuos sólidos urbanos por ejemplo, sólo llegan a 450 ℃. Se puede instalar un sistema en las paredes del horno o en la parrilla misma, recibiendo el calor directamente desde la cámara de combustión, para lo cual es necesario contar con un sistema de protección a la abrasión y corrosión. Si la caldera está fuera del horno se pierde parte del calor al transportarlo, pero disminuyen los efectos corrosivos y abrasivos. Otro aspecto importante a destacar es el bajo contenido de azufre en la biomasa, que llega a valores cercanos a cero y sólo aparece cuando se emplean frutas, semillas y hojas, donde apenas se encuentra en concentraciones foliares cercanas a 0,2% en peso seco. Ello permite que los gases de combustión puedan ser utilizados para precalentar el agua de entrada o el aire secundario, sin temor a que se produzca formación de condensaciones ácidas al bajar la temperatura de salida, y aumentando la eficiencia energética del sistema al aprovechar el calor residual de los gases de combustión.

En el DVD adjunto, en el punto 6, se muestra información sobre calderas de recuperación.

Aprovechamiento del vapor

El vapor generado puede ser utilizado directamente como vapor para procesos industriales o bien para la generación de electricidad mediante el uso de una turbina de vapor, que conectada a un alternador permite la producción de energía eléctrica que posee una gran flexibilidad en su uso. El vapor entrega la energía cinética obtenida por la expansión del mismo y cede parte de su energía a la turbina, condensándose para luego reinsertarlo en la caldera, por lo que se obtiene un circuito prácticamente cerrado con mínimas fugas.

El sistema descrito anteriormente, el ciclo de Rankine, para potencias inferiores a 5 MW tiene un rendimiento bajo. Si la energía contenida en el vapor es el 100%, la parte que se convierte en energía mecánica (casi equivalente a la eléctrica) es del orden del 25% (al aumentar la temperatura de recalentamiento este porcentaje se incrementaría), el resto, es decir el 75%, es preciso disiparlo a la atmósfera puesto que corresponde a la condensación del vapor.

En el DVD adjunto, en el punto 7, se muestra información sobre turbinas de vapor.

Sistema de depuración de gases

Como ha sido mencionado, la biomasa vegetal posee un bajo contenido de azufre y por lo tanto la cantidad de emisiones de óxidos de azufre son mínimas. Con la tecnología disponible, la combustión de biomasa en grandes centrales no representa problemas significativos sobre la calidad de las emisiones, especialmente considerando un adecuado control del proceso en combinación con la existencia de elementos filtrantes tales como ciclones, electrofiltros o

filtros de mangas. Estos sistemas, en general, aseguran una emisión de gases, con niveles globales de contaminantes muy inferiores a los del carbón de buena calidad y el gasóleo.

En el DVD adjunto, en el punto 8, se muestra información sobre turbinas de gas.

En las grandes centrales de biomasa (>10 MW), que en general son plantas de generación eléctrica o cogeneración, es preceptivo la instalación de sistemas de medición y control que aseguran condiciones precisas y estables de proceso, logrando una combustión más eficiente y una menor formación de CO. Estas tecnologías permiten, por otra parte, realizar el proceso de combustión a temperaturas más bajas que las convencionales parrillas, lo que causa una disminución de la formación de óxidos de nitrógeno y, por lo tanto, una combustión más limpia de la biomasa. En las calderas de última tecnología, de funcionamiento totalmente automatizado y mediante un control muy preciso de las condiciones de proceso, se han conseguido resultados satisfactorios en la reducción de emisiones de partículas y CO, lográndose eficiencias que pueden bordear el 90% de disminución de emisiones respecto a la combustión tradicional utilizando combustibles fósiles. Los niveles de emisiones no influyen ni en la calidad ni en la cantidad del vapor generado para el aprovechamiento eléctrico, sus únicas implicaciones son de tipo ambiental, que de acuerdo al tipo de biocombustible utilizado pueden requerir de esfuerzos adicionales la reducción de contaminantes que permitan cumplir la normativa vigente.

La Tabla 10.11 muestra una comparación de las emisiones de un sistema valorización energética de biomasas, a través de combustión de biomasa, con la generación de electricidad a partir de combustibles fósiles.

Tabla 10.11. Emisiones totales en la generación de electricidad a partir de combustión de algunas biomasas y combustibles fósiles

Combustible	Emisiones (g/GWh)		
	CO_2	SO_2	NO_x
Residuos forestales	29	0,11	1,95
Paja	13	0,88	1,55
Residuos avícolas	10	2,42	3,90
RSU	364	2,54	3,30
Gas Natural (1)	446	0,0	0,50
Carbón	955	11,8	4,30
Carbón (2)	987	1,5	2,90

(1): Central de ciclo combinado.
(2): Quemadores de bajo NOx y desulfuración del gas de chimenea FDG (*Flue Gas Desulfurization*).

Sistema de recuperación de escorias

La recuperación de las cenizas de fondo dispone de un mecanismo automatizado que recoge las escorias desde el interior del horno de incineración, lo que incluye un sistema para la disminución de la temperatura, lo que generalmente se realiza haciendo pasar estas cenizas de fondo a través de agua. Las escorias que se producen debido a la combustión de biomasa poseen una diferencia fundamental con las generadas al utilizar carbón, ya que estas últimas suelen presentar un elevado contenido en cadmio y otros metales pesados, y por lo tanto requieren de tratamientos especializados para su almacenamiento y disposición final, siendo necesario su tratamiento como residuos industriales peligrosos. A diferencia de esto las escorias generadas en un sistema de valorización a partir de biomasa pueden ser devueltas al suelo como fertilizante, ya que no presentan dichas características de toxicidad.

Por otra parte existe una fracción importante de cenizas volantes que son recogidas en los sistemas de abatimiento de contaminantes (ciclones y/o filtros de mangas) que pueden representar cifras cercanas al 15 o 20% de las cenizas totales. Dependiendo de las características del proceso, en particular en el caso que la instalación no disponga de cámara de postcombustión, se generan cenizas con un alto contenido de alquitranes y productos orgánicos tóxicos, lo que impide su utilización como subproducto y por lo tanto deben ser tratadas como residuos peligrosos, debiendo ser depositadas en vertederos adecuados y autorizados para ello.

3.4. APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO A TRAVÉS DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

En forma natural la biomasa se degrada aeróbiamente por acción de bacterias y microorganismos que dependiendo del origen de la materia orgánica actúan de una forma u otra, determinando complejos mecanismos que terminan transformando la estructura original de la biomasa. En condiciones de presencia de oxígeno este proceso finaliza en productos finales: CO_2, agua, sulfato, nitrito, nitratos y sales de amonio. Si un proceso análogo se lleva a cabo en

condiciones anaerobias se obtienen como productos un residuo húmedo de difícil degradación y un gas inflamable que se denomina generalmente biogás. Dependiendo de las características de la biomasa original este gas puede tener un contenido de metano de entre 50 y 70%, por lo que su potencial energético es muy elevado y permite una versatilidad de valorización amplia. Este biogás alcanza un poder calorífico de alrededor de 5.000 kcal/m^3.

En la naturaleza es posible observar este proceso con facilidad. Se presenta cada vez que se reúnen condiciones establecidas de biomasa, humedad y ausencia de oxígeno. Un ejemplo de ello son los vertederos de RSU donde los residuos son compactados con poca presencia de oxígeno, produciéndose un biogás que es utilizado en muchos lugares como combustible que sustituye el gas natural o el GLP.

La humedad presente en la biomasa es un factor muy importante para determinar su uso potencial en el proceso de metanización, ya que, a diferencia de otras técnicas de valorización de biomasa residual, un alto contenido de humedad favorece el proceso. Lo anterior hace interesante el aprovechamiento energético de residuos ganaderos y de los fangos de depuración de aguas residuales urbanas.

3.4.1. Descripción del proceso anaerobio de la biomasa

La degradación anaerobia transcurre en varias fases que se pueden resumir de la siguiente manera:

- *Hidrólisis:* Un gran número de microorganismos anaerobios excretan enzimas hidrolíticas que fraccionan los enlaces de los polisacáridos que forman la biomasa, en unidades simples de azúcares, grasas y aminoácidos.
- *Acidogénesis:* Los compuestos son asimilados por algunos microorganismos y/o fermentados, produciendo una gran cantidad de ácidos orgánicos. Se producen también gases como CO_2, H_2 y pequeñas cantidades de NH_3, SH_2, y también alcoholes en especial glicerol.
- *Acetogénesis:* Bacterias denominadas acetogénicas de lento crecimiento, metabolizan los alcoholes, el ácido láctico y los ácidos grasos volátiles, produciendo ácido acético e hidrógeno.
- *Metanogénesis:* El acetato, hidrógeno y CO_2 producido, es transformado por acción de las bacterias metanogénicas, que son un grupo primitivo y reducido de bacterias anaeróbicas, formando metano, CO_2 y agua.

En la fase de hidrólisis se produce una despolimerización de las macromoléculas que se transforman en moléculas más simples. A su vez, estas moléculas se convierten en ácidos grasos durante la fase de acidogénesis. En la etapa de hidrólisis, un ejemplo de ello, en las moléculas más frecuentes en la biomasa, son:

- Los lípidos pasan a ácidos grasos.
- Los polisacáridos a monosacáridos.
- Las proteínas a aminoácidos.
- Los ácidos nucleicos a purina y pirimidinas.

Existe un gran número de tecnologías para la digestión anaeróbia. En general se adaptan a las características de la biomasa que será tratada. La Figura 10.13 muestra algunas de ellas. En términos generales se pueden diferenciar por los siguientes aspectos:

- Sistema de carga y descarga, puede ser continuo o discontinuo.

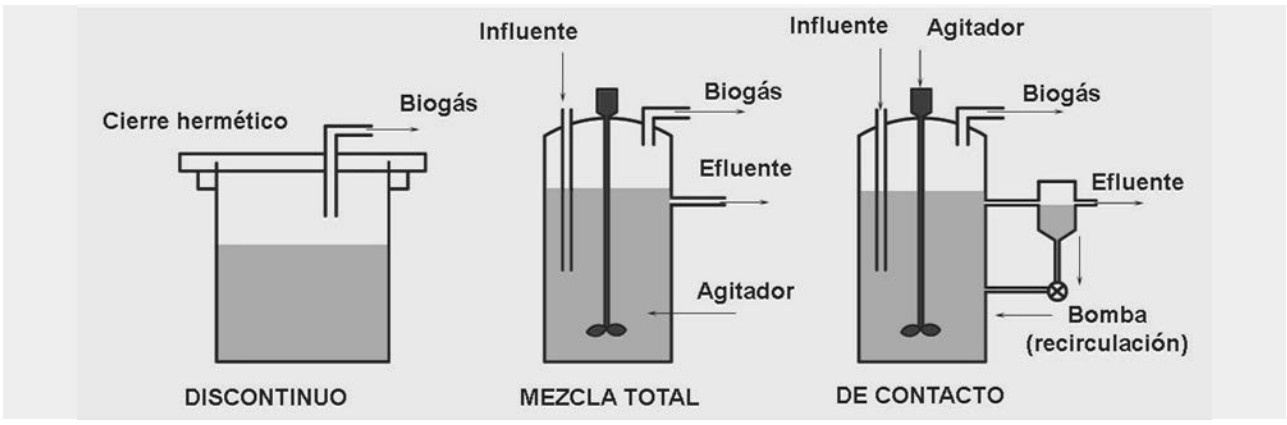


Figura 10.13. Diversos sistemas de digestores anaeróbios.

- Localización y conservación de la biomasa en el interior. Puede ser:
  a) Con biomasa microbiana incluida en toda la masa a digerir (biomasa suspendida) o bien con la biomasa microbiana adherida a un soporte inerte fijo o móvil;
  b) Con digestores de dos fases en cada una de las cuales se optimizan las condiciones para la fase acidogénica y la metanogénica respectivamente.

Los principales parámetros que deben considerarse en el establecimiento y diseño de un digestor son los siguientes:

- *Características del efluente:* concentración de sólidos en porcentaje, demanda química de oxígeno, demanda biológica de oxígeno, contenido total de nitrógeno, pH, conductividad, relación carbono/nitrógeno, alcalinidad, inhibidores (metales pesados o antibióticos).
- *Parámetros de diseño:* sistema de operación, sistema de carga, sistema de descarga, sistema de agitación, sistema de calefacción, aislamiento térmico, forma, volumen necesario según la carga diaria y el tiempo de retención.
- *Instalaciones complementarias:* depósito de almacenamiento previo, unidad de calefacción, gasómetro, unidad depuradora del biogás, unidad tratamiento de fangos y efluentes, unidad de compresión del biogás.
- *Parámetros de la digestión:* características del efluente, temperatura de digestión, pH, alcalinidad, potencial redox (debe ser lo más reductor posible, para eliminar las sustancias oxidantes), factores nutricionales, nitrógeno, relación C/N (debe estar entre 25 y 35) y contenido de azufre.
- Es necesario un especial cuidado con la cantidad de ácido sulfhídrico del biogás, ya que es un agente altamente corrosivo pudiendo dañar irreversiblemente los equipos utilizados.

La Tabla 10.12 muestra los rendimientos típicos de algunos residuos en la producción de biogás.

El gas generado por el proceso de digestión anaerobia, es utilizado generalmente como combustible para alimentar motores o turbinas a gas, produciendo luego electricidad. En términos generales los sistemas de metanización para la producción de energía eléctrica deben contar con un proceso de depuración y tratamiento de residuos orgánicos para que se pueda conseguir una viabilidad técnica, que asegure el abastecimiento de las materias primas, y comercial, disminuyendo los costos de transporte, tratamiento y disposición final de residuos de origen orgánico. Es una alternativa altamente recomendable para la valorización de residuos de la industria ganadera y la combinación con procesos de depuración de aguas residuales urbanas.

Tabla 10.12. Producciones medias de biogás de diferentes residuos

Tipo	Rendimiento (m^3 gas/t MS)	Producción (kg/día y animal)
Residuos urbanos (Materia orgánica)	116	—
Estiércol de ovino y caprino	300	1,6
Estiércol de vacuno	320	49
Paja	330	
Paja de cebada	360	
Contenido estomacal cerdo	380	
Melaza	380	
Prensado de patata	390	
Gallinaza	390	
Purín de cerdo	400	
Hojas	410	
Contenido del rumen	420	
Paja de trigo	440	
Hoja de remolacha azucarera	480	
Vegetales, trébol	500	
Estiércol de aves	500	0,1
Ensilado de maíz	550	
Grano de cebada y lúpulo	580	
Estiércol de caballo	590	
Estiércol de cerdo	700	9,5
Pulpa de remolacha azucarera	750	
Grasa de desnatado	1.100	

Un claro ejemplo del uso de biomasa y aprovechamiento de residuos urbanos se tiene en el municipio de Växjö en Suecia. En este municipio de 170.000 habitantes el gobierno local ha establecido un convenio con las personas para que hagan la primera selección y separación de residuos orgánicos en

los domicilios y los negocios locales. En el programa participa activamente el 90% de la población.

La recogida selectiva de los residuos se realiza con carros basureros especialmente adaptados para tal fin y que además funcionan con el biogás obtenido mediante digestión anaerobia del residuo. Para optimizar el proceso de obtención del gas, el municipio ha firmado otro convenio con los agricultores para que entre los ciclos de cultivo de productos comerciales tengan un ciclo de producción de pastura de rápido crecimiento que se cosecha escalonadamente para asegurar el abastecimiento del material vegetal a las plantas de digestión. Esta pastura recién cortada se introduce en mangas plásticas de hasta 90 metros de largo en las que se inicia el proceso de ensilaje y fermentación. De estos tubos se obtiene un residuo líquido con un alto poder fertilizante que emplean los agricultores en una primera etapa; el residuo sólido es dosificado para su aplicación en los tanques de digestión en los que se mezcla con la fracción orgánica de los RSU que previamente han sido separados y recolectados.

La planta de digestión consta de varios tanques unidos en serie para mantener la presión del gas y la recirculación del mismo para acelerar el proceso. Con este sistema se han alcanzado producciones de hasta 350 Nm^3/hora de biogás. Este gas es sometido a presurización y lavado a contraflujo en agua para obtener finalmente el metano puro. El agua de tratado es después desgasificada a presión atmosférica obteniéndose CO_2 y restos de metano que es reintroducido al circuito de alta presión (10 a 12 bar).

El volumen de biogás obtenido es suficiente para mantener la flota de 40 buses municipales y los 10 carros adaptados para la recolección de los residuos orgánicos, además de otros 500 vehículos pequeños de transporte ligero. Los agricultores que participan de este proyecto reciben además fertilizante sólido de alta calidad que les permite mantener y mejorar 1.500 hectáreas de cultivo intensivo.

3.5. RESUMEN DE ALTERNATIVAS PARA LA VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE LA BIOMASA

A título de resumen, la Figura 10.14 expone los diversos procesos que permiten la valorización energética de la biomasa.

3.6. OTRAS VALORIZACIONES DE LA BIOMASA RESIDUAL

La valorización energética es una de las alternativas más interesantes para el aprovechamiento de los residuos de origen orgánico y los restos de cultivos agrícolas, forestales y de la industria alimenticia. Pero existen otras opciones que pueden ser consideradas al plantear un manejo integral de este tipo de residuos.

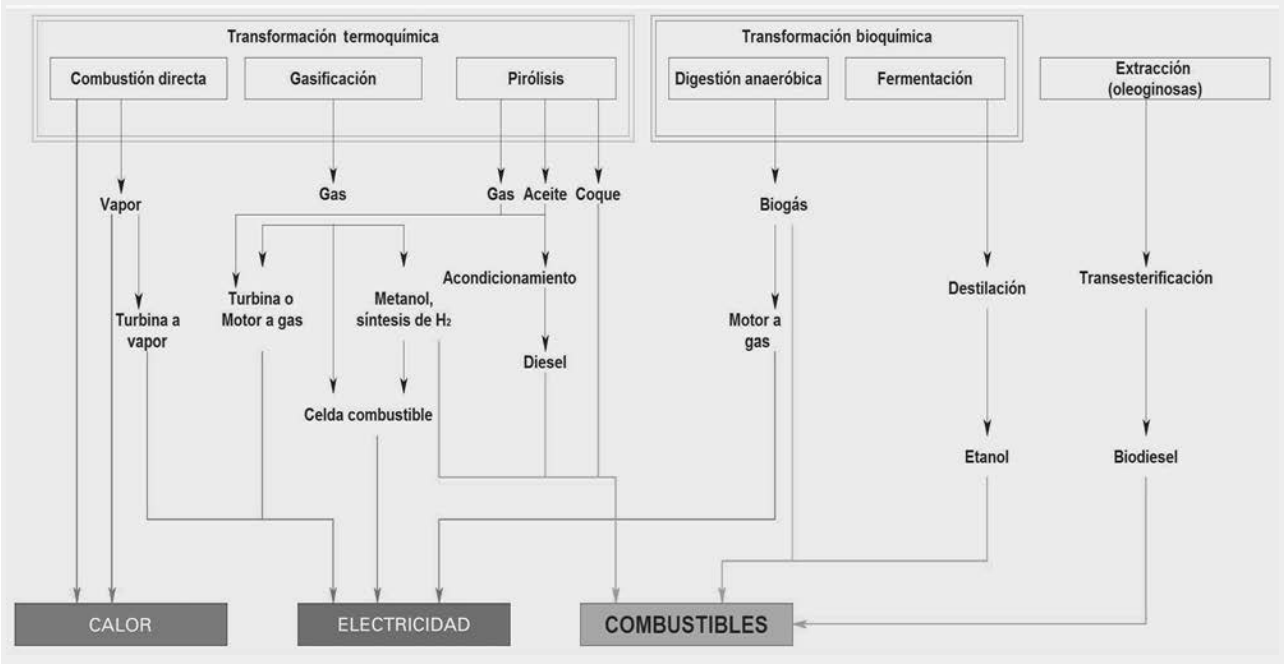


Figura 10.14. Resumen sintético de los procesos de producción y aprovechamiento de los biocombustibles.

3.6.1. Compostaje

El compostaje es una de las técnicas más utilizadas en la actualidad. Permite la obtención de un sustrato rico en nutrientes y puede ser utilizado para mejorar la calidad de suelos agrícolas o forestales, nutriendo cultivos y permitiendo la valorización de residuos, principalmente agrícolas e industriales, que difícilmente pueden tener otro uso. Vale la pena añadir una variante de compostaje que se ha inaugurado en 2007 en Denia (Alicante, España) con una planta de compostaje de algas marinas con restos de poda de jardín. La planta está previsto que genere 20.000 t/año de compost. Desde el punto de vista de la valorización, el compostaje se considera un sistema de reciclaje interno del proceso completo de producción de agroalimentos. En general los sistemas de compostaje se clasifican en sistemas abiertos y sistemas cerrados.

3.6.1.1. Sistemas de compostaje abierto

Los sistemas abiertos son los tradicionales de compostaje. Los residuos a compostar se disponen en montones o pilas que pueden estar al aire libre o en naves. La aireación de la masa fermentable puede hacerse por volteo mecánico de la pila o mediante ventilación forzada. Los sistemas más utilizados son los descritos a continuación.

Compostaje en pilas por volteo

La pila es oxigenada periódicamente, por lo que con el objetivo de lograr buenos niveles de estabilización e higienización el control del nivel interno de la oxigenación y la temperatura es fundamental. Bajo este sistema usualmente se utilizan alturas de pila de entre 1,5 y 2 metros y anchos de base de entre 2,5 y 3 m. El tiempo de fermentación o de residencia en la zona de volteo suele ser de dos a cuatro meses, transcurrido este tiempo el compost deberá pasar a la zona de maduración antes de proceder a su harneo y preparado para la comercialización.

Compostaje en pilas estáticas con aireación natural

Es el sistema más antiguo que se conoce y se realiza en pilas, de altura reducida, y no se mueven durante el compostaje. La ventilación es natural a través de los espacios de la masa a compostar. Las dimensiones de los montones deben estar en función de los equipos utilizados para compostar; no interesa que sean más altos de 1,5 m, con una anchura en su base de unos 2,5-3 m, de la longitud deseada y de frente triangular, debiendo presentar mayor pendiente en los lugares o épocas más lluviosas. Este tipo de compostaje tiene como principal desventaja el largo periodo de proceso requerido y que sólo es posible con materiales o mezclas muy porosas en que la aireación pasiva se da naturalmente. En la mayor parte de las experiencias de compostaje industriales se prefieren sistemas con volteo o aireación forzada.

Compostaje en pilas estáticas con ventilación forzada

La pila de fermentación es estática y en su formación se ha dispuesto un sistema mecánico de ventilación por tuberías perforadas o por un canal empotrado en la solera. Las tuberías se conectan con un ventilador que asegura la entrada de oxígeno y la salida de CO_2. Esta ventilación puede hacerse por succión o inyección de aire o bien mediante sistemas alternantes de succión e inyección. Con el fin de reducir los problemas de olores, el aire se pasa a través de una pila de compost maduro que actúa como filtro.

3.6.1.2. Sistemas de compostaje cerrados

Los sistemas cerrados de compostaje se utilizan de manera industrial generalmente para compostar residuos en las proximidades de ciudades de tamaño medio o grande. En estos sistemas la fase inicial de fermentación se realiza en reactores que pueden ser de dos tipos: horizontales o verticales, mientras que la fase final de maduración se hace al aire libre o en naves abiertas. Son sistemas desarrollados para reducir considerablemente las superficies de compostaje y lograr un mejor control de los parámetros de fermentación y controlar los olores de forma más adecuada. Aunque estos sistemas requieren costos de instalación superiores a los anteriores, presentan la ventaja de ser más rápidos y por tanto requerir menos espacio.

Reactores verticales de compostar

Los reactores verticales pueden operar de forma continua o discontinua. En el primer caso, el material a compostar se encuentra en forma de masa única, mientras que en el segundo caso, la masa del compostaje se sitúa en distintos niveles.

En los sistemas cerrados continuos se utilizan reactores de 4-10 m de altura, con un volumen total de 1.000 a 3.000 m^3. El biorreactor consta de un cilindro cerrado, aislado térmicamente, que en su parte inferior posee un sistema de aireación y extracción de material. Éste se introduce por la parte superior mediante un tornillo alimentador. A medida que se va extrayendo el material compostado, el material fresco va descendiendo. El control de la aireación se realiza por la temperatura y las características de los gases de salida (éstos son aspirados por la parte superior del reactor). El tiempo de residencia es de aproximadamente dos semanas.

Los reactores verticales discontinuos constan de un depósito cilíndrico de grandes dimensiones dividido en varios niveles (cada nivel tiene de 2 a 3 m de altura).

La materia a compostar se coloca en lo más alto y mediante dispositivos mecánicos se voltea la masa a la vez que va descendiendo al piso inferior. La humedad requerida para llevar a cabo el proceso se consigue por evaporación del agua del material situado en los niveles inferiores, la cual se encuentra a una mayor temperatura, o bien se dispone de sistemas de suministro de agua. Cuando la fracción orgánica ha descendido al último piso se da por concluida la fermentación y el compost sale al parque de maduración. El tiempo de residencia en el fermentador es de una semana. El inconveniente de este tipo de reactores es el elevado coste de instalación y de mantenimiento de la planta.

Otra variante de reactor vertical lo constituye el reactor circular. Los que existen actualmente tienen un diámetro de 6 a 36 metros y una altura de 2 a 3 metros. El material a compostar se introduce por la parte superior del reactor, y la masa se voltea mediante un brazo giratorio, la salida del material se realiza por el centro de la base. La aireación se realiza por la parte inferior. El tiempo de retención es de 10 días, transcurridos los cuales pasan al parque de maduración.

Reactores horizontales de compostar

En los reactores horizontales la materia orgánica, generalmente preseleccionada (separación de inertes), se somete al proceso de compostaje entre 15 y 30 días en condiciones estáticas (reactor túnel) o de volteo periódico (reactor rectangular dinámico). Un tipo de reactores son los denominados reactores de túnel, los cuales tienen forma de caja rectangular de 4 m de altura, 5,5 m de ancho y longitud variable según el volumen a tratar. La agitación se logra mediante mecanismos hidráulicos y la aireación se realiza por sistemas situados en la parte inferior. El tiempo de reacción es de 14 días y el producto requiere generalmente un tratamiento posterior.

El reactor rectangular tiene forma de caja rectangular de 3 m de altura y 6 m de ancho, y longitud variable según las necesidades. El material es descargado por la parte superior, y con un dispositivo que penetra en el reactor, parecido a una fresa de un reactor, se mezcla y se descarga en otra zona del reactor mediante una cinta transportadora y una grua móvil. Con el mismo sistema se extrae el material una vez compostado. La aireación se realiza por la parte inferior. El tiempo de retención es de 14 a 21 días y normalmente no necesita un tratamiento posterior.

3.6.2. Características de los residuos utilizados para el compostaje

Existen parámetros que deben ser considerados para que los resultados obtenidos en los procesos de compostaje permitan un producto en condiciones óptimas para su utilización como sustrato fertilizante. Entre ellos los más relevantes son:

a) *Equilibrio Carbono / Nitrógeno*

El principal objetivo de mezclar diferentes residuos o materiales para iniciar una faena de compostaje es equilibrar la relación carbono nitrógeno (C/N) a valores entre 25 y 35/1 en forma ideal. Valores menores a 25 ocasionan la perdida de nitrógeno en forma de NH_3 y concentraciones mayores a 35 retrasan el proceso haciéndolo más lento de lo esperado.

b) *Contenido de humedad*

Los microorganismos al igual que cualquier ser vivo necesitan agua para vivir. Los hongos, bacterias y actinomicetes que participan en el compostaje no son la excepción. El contenido de humedad ideal para una pila de compostaje es entre 50 y 60%. Un exceso de humedad, mayor al 60%, dificulta el proceso y por lo tanto esto debe ser evitado para no alterar las condiciones esperadas de funcionamiento.

c) *Tamaño de partículas*

El tamaño de partículas tiene alta influencia en las características del compostaje. No puede ser demasiado grande (> 2 o 3 cm.) por la lenta degradación que sufrirán esos materiales debido a la escasa superficie para el ataque microbiano. Tampoco pue-

de ser muy pequeño ya que no habría aireación pasiva y la aireación forzada o externa sería necesaria con mayor frecuencia.

d) *Aireación*

Los microorganismos que participan en el compostaje son o aerobios o facultativos (actúan en condiciones aerobias y anaerobias). Sin embargo, está comprobado que el proceso se optimiza bajo condiciones netamente aerobias, además de generarse mínimos problemas de olor y atracción de vectores. Un déficit de aireación provoca que la pila se torne anaerobia, se generen malos olores, la temperatura baje y el proceso se alargue. Por ello una forma de conocer el momento en el cual es necesario efectuar la aireación de la pila es midiendo el contenido de O_2 en el espacio poroso al interior de la pila, así cuando éste es limitante (< 2%) es recomendable la aireación.

e) *Temperatura*

Es el mejor indicador del proceso ya que la curva de temperatura se ve afectada por numerosos factores, tales como la humedad, el contenido de oxígeno y la calidad de la mezcla inicial (C/N). La curva típica teórica de temperatura en el compostaje describe claramente tres etapas, una etapa mesofílica, con temperaturas ascendentes de entre 20 ℃ y 50 ℃, luego una etapa termofílica, con temperaturas estables de entre 50 ℃ y 60 ℃, y finalmente una etapa de enfriado y maduración, donde la temperatura desciende y estabiliza en torno a los 20 ℃. La temperatura se debe medir al menos una vez por semana cada 20 metros a ambos lados de la pila en la zona de mayor temperatura. Todos los registros de una pila se promedian para dar el valor de temperatura en esa fecha.

f) *Duración*

El compostaje puede demorar desde 3 meses a 1 año. El promedio en el sistema de pilas volteadas es de entre 6 y 8 meses. Esto depende de las condiciones iniciales, la frecuencia de las aireaciones, la humedad presente en el sustrato, el tipo de residuos utilizados y la técnica aplicada.

4. Potencial de aprovechamiento y costos de las biomasa

Los sistemas descritos son económicamente sustentables en el tiempo si se asegura obviamente una provisión de biomasa que permita el establecimiento de una industria para la valorización de estos recursos. Si bien la biomasa es un recurso renovable y que en forma continua se genera en los sistemas naturales, su aprovechamiento a nivel industrial debe considerar una serie de factores que permitan predecir de manera concreta el potencial real que dichos recursos poseen para su inclusión en sistemas productivos y de valorización. Esto tiene especial sentido en el caso de los cultivos agrícolas y forestales, ya que la necesidad creciente como fuente de energía tiene como limitante la disponibilidad de suelo y los demás recursos necesarios para su establecimiento, como el agua de riego, fertilizantes y mano de obra calificada.

En este capítulo se realiza una revisión general del potencial de aprovechamiento que posee cada uno de los cultivos descritos, considerando en ello la productividad y los efectos esperados sobre los recursos que son necesarios para asegurar su valorización.

4.1. CULTIVOS ENERGÉTICOS

Los cultivos energéticos se definen como aquellos que han sido planificados específicamente para la obtención de energía a partir de la biomasa que es cultivada. Estos cultivos pueden proceder de especies herbáceas, arbustivas o forestales, y la biomasa producida puede ser utilizada como materia prima de diversos procesos de valorización, como los que han sido descritos en el apartado 3. Las aplicaciones energéticas más comunes de este tipo de cultivos son la producción biocombustibles líquidos a partir de cereales y oleaginosas y el establecimiento de cultivos de especies leñosas de rápido crecimiento, para la obtención de biocombustibles sólidos.

En el DVD adjunto, en el punto 9, se muestra información sobre cultivos energéticos.

4.1.1. Cultivos para bioaceites

La obtención de aceites vegetales, y su posterior transformación en bioaceite a través del proceso de esterificación, se lleva a cabo a partir de cultivo de especies oleaginosas, específicamente el aceite contenido en semillas de los cultivos, que es extraído a partir del fraccionamiento y prensado de estas semillas. Su contenido energético es elevado y puede ser quemado directamente en motores de combustión, pero esto puede significar problemas en el proceso, lo que justifica su transformación en biodiésel.

Los principales cultivos utilizados para la obtención de aceites vegetales y la producción de biodiésel, son las semillas de girasol, colza y soja. El biodiésel es mezclado luego con diésel, en una proporción, aproximada, del 5%, sustituyendo parte importante del petróleo consumido en la automoción.

La extracción de aceites contenidos en las semillas de los cultivos de oleaginosas, posee rendimientos menores a otros cultivos agrícolas, ya que las semillas representan en promedio cerca de un 30% de la biomasa total del cultivo. Considerando que en promedio las semillas contienen alrededor de 40% de peso en aceite, y la transformación en biodiésel posee una eficiencia de 97%, la productividad final de un cultivo como la colza ronda los 1.300 litros de biodiésel por hectárea.

Los promedios de productividad de los principales cultivos se presentan en la Tabla 10.13.

Tabla 10.13. Productividad de cultivos energéticos para producción de biodiésel

Cultivo	Productividad del cultivo (t/ha)	Rendimiento en biodiésel (lt/ha y año)
Colza	3,3	1.300
Girasol	1,9	950
Soja	3,1	446
Olivos	1,0	1.200

Otra fuente importante de aceites vegetales para la producción de biodiésel son aquellos provenientes de la recolección de los aceites utilizados de manera doméstica. En el Reino Unido son producidos anualmente alrededor de 100.000 toneladas de aceites de cocina residuales, los cuales son posibles de convertir en biodiésel con una eficiencia cercana al 97%. Esta problemática se expone detalladamente en el Capítulo 4 de esta obra.

La producción de biodiésel en los principales países productores del mundo se muestra en la Tabla 10.14.

Tabla 10.14. Producción de biodiésel en los principales países productores del mundo (2005)

País	Millones de litros
Alemania	1.916,8
Francia	565,1
Italia	454,8
Republica Checa	152,7
EE UU	284,0
Polonia	114,8
Austria	97,6
Eslovaquia	89,5
España	83,8
Dinamarca	81,5
Reino Unido	58,5
Total mundial	**3.500,0**

4.1.2. Cultivos para bioalcoholes

Los bioalcoholes son biocombustibles obtenidos a partir del fraccionamiento de la biomasa, para la obtención de un alcohol, como, por ejemplo, el etanol. Su uso puede ser puro, o bien en mezclas de entre 5 y 10% con gasolina normal, alcanzando valores de sustitución que pueden alcanzar hasta el 20% o 25%.

Los principales cultivos utilizados para la obtención de alcohol, son agrupados de acuerdo a las características de la biomasa generada, y de esta manera el sustrato se forma para la obtención del alcohol de forma industrial.

En primer lugar, cultivos como la caña de azúcar y el sorgo azucarero, poseen un alto contenido de azúcares, en forma de glucosa, sacarosa o almidón. Luego se encuentran los cultivos como cereales o tubérculos, donde destacan la remolacha y el maíz, que producen una biomasa rica en almidones. Finalmente se encuentran los cultivos con alto contenido de celulosa, que permiten la obtención de alcohol a través del fraccionamiento de la biomasa, generalmente representadas por especies forestales de rápido crecimiento.

Los rendimientos esperados de estos cultivos son mucho mayores a las tasas de disponibilidad asociadas al uso de fracciones residuales de cultivos agrí-

Tabla 10.15. Productividad de cultivos energéticos para producción de bioalcoholes

Cultivo	Productividad del cultivo (t/ha y año)	Rendimiento en etanol (lt/ha y año)
Remolacha	55	5.900
Sorgo azucarero (grano)	35	3.000
Maíz	10	2.400
Caña de azúcar	50	3.500
Patata (tubérculo)	62,5	5.000
Cereales	7,5	2.500
Pino (crecimiento anual)	7	2.500

colas y forestales, ya que la totalidad de la biomasa fijada en ellos se dispone para su transformación energética. La Tabla 10.15 reproduce valores promedio de productividad para cultivos asociados a la obtención de alcoholes.

En la actualidad el etanol es producido en varios países del mundo que utilizan los cultivos que mejor se adapten a las condiciones climáticas y que permitan la obtención de mayores rendimientos, y de esta forma una tasa mayor de etanol producido por hectárea. Los principales productores de etanol a nivel mundial son Brasil y EE UU, utilizando caña de azúcar y maíz, respectivamente. En la Tabla 10.16 se presenta la producción mundial de etanol para los principales países productores en el año 2004.

4.1.3. Cultivos de leñosas de rápido crecimiento

Si bien el crecimiento de las especies forestales es más lento que el de cultivos agrícolas, la acumulación final de biomasa que se obtiene en dichos sistemas es varias veces mayor. La obtención de biomasa residual se asocia entonces a periodos de tiempo mayores, pero con tasas de extracción de biomasa más elevadas. Dicha biomasa se extrae principalmente una vez que el bosque es intervenido con fines comerciales, ya sea como productor de madera para aserrío o de trozas para la industria papelera y de tableros.

En rotaciones de plantaciones de especies forestales de rápido crecimiento, 15 o 20 años hasta la maduración del bosque, es posible obtener rendimientos de entre 300 y 450 m^3 por hectárea, un ejemplo de ello son los rendimientos obtenidos en zonas mediterráneas de Chile para plantaciones de

Tabla 10.16. Producción de etanol en los principales países productores (2004)

País	Millones de litros
Brasil	15.100
EE UU	13.381
China	3.649
India	1.749
Francia	829
Rusia	750
Sudáfrica	416
Reino Unido	401
Arabia Saudita	299
España	299
Tailandia	280
Alemania	269
Ucrania	250
Canadá	231
Polonia	201
Indonesia	167
Argentina	159
Total mundial	**46.000**

Pino de Monterrey (*Pinus radiata* D. Don), con incrementos anuales máximos de 15 a 25 m^3/hectárea y año.

En el caso de bosques naturales, o para especies de lento crecimiento los rendimientos son menores y las rotaciones de entre 80 y 120 años, con incrementos anuales de 5 a 10 m^3/hectárea y año y productividades que alcanzarían alrededor 1.000 m^3 por hectárea, en el caso de bosques naturales del sur de Chile.

Una de las especies leñosas con mejor potencial para su aprovechamiento energético es el chopo (*populus spp.*) ya que se ha avanzado significativamente en la creación de clones modificados genéticamente, obteniéndose híbridos con tasas de crecimiento bastante altas comparadas con otros cultivos forestales, alcanzado entre 25 y 35 m^3/ha y año.

La Tabla 10.17 indica la productividad promedio de especies forestales de rápido crecimiento en climas mediterráneos.

Una especie tropical que parece tener un gran futuro es la jatrofa (*eutropha eurcas*). Se trata de un arbusto original de India y Madagascar, capaz de producir grandes cantidades de biodiésel. A diferencia de otras oleaginosas, como el maíz, la jatrofa no es apta para el consumo humano ni animal, debido a su ele-

Tabla 10.17. Rendimientos promedio de especies forestales de rápido crecimiento

Especie	Productividad del cultivo (m^3/ha y año)	Rotación del cultivo (años)
Pinus taeda	21-35	18 a 25
Pinus elliotti	30	18 a 25
Eucalyptus grandis	38-42	7 a 12
Eucalyptus saligna	30-35	10-12
Eucalyptus globulus	30	10-15
Populus deltoides	22	12
Populus nigra	29	12
Populus x euroamericana	29	12
Populus spp.	20	10 – 12
Salix spp.	15-20	10-12
Pinus radiata	15-25	15-25
Acacia melanoxylon	30-60	25-35

vada toxicidad. Otra ventaja es que su fruto, semejante a una nuez, con tres semillas en su interior, genera tres veces más aceite que el maíz y diez veces más que la soja. También tiene una cantidad de azufre inferior a las oleaginosas citadas anteriormente, lo que le permite ser usada en los motores diésel modernos.

Desde el punto de vista ambiental la jatrofa tiene la virtud de crecer en suelos desérticos o baldíos, como los impregnados o saturados de pesticidas. Ello constituye un acicate para países pobres. La India ha diseñado un plan para cultivar esta planta en el estado de Andra Pradesh, en el sudeste del país, después de que la compañía estatal de ferrocarriles lo probara en sus locomotoras diésel. En estas condiciones, una superficie de 1.000 hectáreas puede producir dos millones de litros de biodiésel al año. Además, el gobierno hindú está trabajando para lograr una variedad genéticamente modificada que produzca más del 40% de aceite que produce la planta actual.

Una planta de características semejantes a la citada jatrofa es el cardo (*Cynara cardunculus*) ya que se trata de una planta de secano bien adaptada al clima mediterráneo, mientras que la colza precisa latitudes más altas. Su cultivo masivo permitiría recuperar tierras abandonadas y dar rentabilidad a los agricultores. De las semillas, por prensado, se extrae el aceite y el resto de la planta, una vez seca, o semiseca, se usa como materia orgánica para biocombustible.

Otros cultivos que se han promovido y desarrollado en los últimos años han sido la carinata, de la que se obtiene una semilla con aceite para biodiésel y crece bien en zonas semiáridas de Extremadura y Andalucía, y la paulownia, de crecimiento ultrarrápido que puede soportar sequías de hasta dos años.

En línea semejante, un grupo de investigadores chilenos del Instituto Forestal INFOR, entre los años 2001 y 2005, han desarrollado unas variedades de eucaliptos que se adaptan bien a las zonas áridas y semiáridas (IV y VI región del país andino). El proceso seguido pasa por la propagación clonal del eucalipto a través de un cultivo *in vitro*, lo que permite facilitar la clonación de individuos de características superiores. Gracias a ello el crecimiento favorable ha permitido el retorno de la inversión sobre los 10 años.

4.1.4. Costos de producción de los biocombustibles

Existen diferencias significativas en los costos de producción de los biocombustibles en los países productores, debido a factores económicos internos, a políticas específicas de subvención y la productividad específica de cada cultivo para la producción del biocombustible que se pretende producir. Es posible estimar en promedio los costos de producción del biodiésel y del bioetanol presentados en la Tabla 10.18, que muestra el costo de producción por productividad del cultivo, en euros (€) por litro y por unidad de energía potencial en € por GigaJoule (GJ).

Tabla 10.18. Costos de producción del biodiésel y el bioetanol

Fuente	Biocombustible	Costo de producción (€/litro)	Costo de producción (€/GJ)
Caña de azúcar	Etanol	0,25-0,35	11,6-16,6
Maíz	Etanol	0,35	15,0
Trigo	Etanol	0,53	25,0
Remolacha	Etanol	0,60	28,3
Cereales	Etanol	0,71	34,1
Madera	Etanol	0,44	20,8
Girasol	Biodiésel	0,60-0,73	17,5-21,6
Soja	Biodiésel	0,33-0,70	10,0-21,0
Aceites usados	Biodiésel	0,20-0,40	6,1-12,2
Colza	Biodiésel	0,33-0,66	10,2-19,1

Los costos de otros biocombustibles, como los residuos agrícolas y forestales, poseen precios que varían dependiendo del tipo de cultivo, la tecnología utilizada y la fracción de la biomasa que es utilizada. Se puede establecer que en términos generales poseen un costo de entre 33 y 41 €/t. En promedio es posible determinar además que la inversión necesaria para la construcción de una instalación industrial que permita el aprovechamiento energético de estos residuos, bordea los 1.600 € por KW instalado, con un costo de producción por unidad de energía de 66 € por MW · h.

Una estimación para ejemplificar el desglose de costos de producción de etanol a partir de biomasa celulósica de origen forestal se presenta en la Tabla 10.19.

Tabla 10.19. Costos de producción de etanol a partir de biomasa celulósica

Etapa	Costo de (€/litro)	% del total
Materia prima	0,15	34
Energía producción	0,11	25
Productos químicos	0,025	6
Costos de producción	0,04	9
Costos de capital	0,11	26
Total	**0,43**	**100**

4.2. GENERACIÓN DE RESIDUOS DE LA INDUSTRIA AGRÍCOLA Y GANADERA

Corresponde a la biomasa residual presente en los residuos generados por la industria agrícola, a través de los remanentes de cultivos o bien a través de actividades industriales de transformación de alimentos, donde dichas fracciones no son consideradas como parte del cultivo cosechado propiamente como tal. Es una de las fuentes donde la disponibilidad de biomasa para su valorización posee uno de los más importantes potenciales, ya que se trata de actividades que se distribuyen en un amplio espectro de situaciones climáticas, económicas y tecnológicas.

Como es característico a la biomasa residual, estos residuos poseen una variabilidad que depende de cada cultivo y sus propiedades intrínsecas. Pueden tener malas condiciones fitosanitarias derivadas de plagas presentes en el cultivo original, que hay que considerar en los tratamientos posteriores que se realizarán.

De acuerdo a los datos entregados por la FAO, los más importantes cultivos agrícolas a nivel mundial son los cultivos de cereales que alcanzan casi un 50% de la superficie cultivada, siguiendo luego los cultivos de oleaginosas con un 16% y las forrajeras con 13%. Los cultivos de árboles frutales, que aportan una cantidad importante de residuos leñosos por las podas, alcanzan una superficie equivalente al 3,4% de la superficie mundial de cultivos.

Una estimación, de acuerdo a los datos recopilados de los principales cultivos, permite establecer la biomasa residual disponible susceptible de ser valorizada, y que son resultantes de las labores de manejo y aprovechamiento tradicional de cada cultivo, resultados que son presentados en la Tabla 10.20.

Tabla 10.20. Biomasa residual de principales cultivos agrícolas

Cultivo	Biomasa residual (t/ha)
Almendro	2,0
Arroz	8,0-8,5
Cereales	2,5-5,5
Cítricos	2,0
Frutales	1,3-3,0
Maíz	20-35
Olivos (podas anuales)	1,4-1,7
Patata	3,5-4,5
Remolacha	8,5
Viñedos	2,0

Existen diferencias apreciables en las tasas de producción de biomasa residual, lo cual se explica por diferencias en rendimientos y la intensidad de cultivo. Es necesario identificar que existe además una diferencia entre cultivos anuales y perennes que deben ser considerados, ya que el esfuerzo productivo necesario para establecer plantaciones anualmente es claramente superior al necesario en cultivos de carácter perenne, determinando por ello productividades diferentes, pero una intensidad mayor en el uso de recursos para el establecimiento de los cultivos. Este condicionante puede ser relevante desde el punto de vista ambiental dada la extracción masiva de nutrientes a que es sometido el suelo y las cantidades importantes de agua de riego que son necesarias para establecer los cultivos anuales.

4.2.1. Residuos industriales ganaderos

En este apartado se analizan las posibilidades de valorización de determinados residuos industriales procedentes de la explotación intensiva ganadera.

4.2.1.1. Los estiércoles

El estiércol es una mezcla de las camas de los animales con sus deyecciones, que ha sufrido fermentaciones más o menos avanzadas primero en el establo y luego en el estercolero. Se incluye en este apartado ya que, básicamente, el potencial de valorización energética se debe a la presencia de los residuos de celulosa (camas).

El estiércol es un abono compuesto de naturaleza órgano-mineral, con un bajo contenido en elementos minerales. Su nitrógeno se encuentra casi exclusivamente en forma orgánica y el fósforo y el potasio al 50% en forma orgánica y mineral, pero su composición varía entre límites muy amplios, dependiendo de la especie animal, la naturaleza de la cama, la alimentación recibida, etc. Por termino medio, un estiércol con un 20-25% de materia seca contiene 4 kg/t de nitrógeno, 2,5 kg/t de anhídrido fosfórico y 5,5 kg/t de óxido de potasio. Por lo que hace referencia a otros elementos contiene, por tonelada, 0,5 kg de azufre, 2 kg de magnesio, 5 kg de calcio, 30-50 g de manganeso, 4 g de boro y 2 g de cobre. El estiércol de caballo es más rico que el de oveja, el de cerdo y el de vaca. El de aves de corral o gallinaza es, con mucho, el más concentrado y rico en elementos nutritivos, principalmente nitrógeno y fósforo.

Los estiércoles que producen un mayor enriquecimiento en humus son aquellos que provienen de granjas en las que se esparce paja u otros materiales ricos en carbono como cama para el ganado, y se espolvorean sobre ellos rocas naturales trituradas (fosfatos, rocas silícicas, etc.) y tierra arcillosa para una mejora de la calidad. Un animal en estabulación permanente produce anualmente alrededor de 20 veces su peso en estiércol. El procedente de granjas intensivas se reconoce fácilmente por su desagradable olor a putrefacción, que da lugar a la formación de sustancias tóxicas para el suelo debido a su alto contenido en nitrógeno proteico y a sus elevadas tasas de antibióticos y otros fármacos. Por tanto estos residuos deben utilizarse con mucha precaución.

El estiércol fresco puede ser utilizado en compostaje de superficie directamente. Se usa sobre todo en cultivos exigentes en abonado que toleran bien la materia orgánica fresca, como es el caso de patata, remolacha, tomate, etc., así como en los cultivos plurianuales como frutales y viñas, sobre los abonos verdes y las praderas permanentes para los aportes de otoño y comienzos de invierno.

Se utiliza en dosis importantes; un estercolado medio supone 30 t/ha, pero a menudo se utilizan dosis mayores, 40-45 t/ha cuando se busca mejorar el suelo. De acuerdo con las cifras medias de su composición, un estercolado de 30 toneladas supone un aporte por hectárea de 120 kg de nitrógeno, 75 kg de anhídrido fosfórico y 165 kg de óxido de potasio. Por tanto, puede decirse que el estiércol es a la vez una enmienda y un abono.

En clima seco el aporte debe realizarse dos meses antes de la siembra y en caso de que sea húmedo, tres meses antes. En suelos arcillosos se debe aplicar estiércol muy hecho y con bastante anticipación a la siembra, mientras que si son arenosos puede ser menos elaborado y las estercoladuras serán más frecuentes y en menor cantidad. Los aportes en suelos calizos deben ser frecuentes y débiles, y en suelos ácidos se ha de realizar una enmienda caliza que active y favorezca la descomposición de la materia orgánica.

4.2.1.2. Alternativas para el uso de la gallinaza y la palomina

La gallinaza está compuesta por las deyecciones de las aves de corral, junto con el material usado en las camas y, a veces, cal en pequeña proporción (ésta es utilizada sobre el piso para mantener unas condiciones sanitarias permisibles en los corrales). La palomina procede del excremento de las palomas, siendo ambos abonos muy estimados por su elevado contenido en elementos fertilizantes.

La gallinaza fresca es muy agresiva a causa de su elevada concentración en nitrógeno. Caso de usarla como fertilizante y para mejorar el producto conviene que se composte en pilas (al igual que la palomina). Con más razón se compostará si procede de granjas intensivas, mezclándose con otros materiales orgánicos que equilibren la mezcla, enriqueciéndolo si fuera necesario con fósforo y potasio naturales. Ciertos autores aconsejan rechazar el estiércol procedente de la cría industrial de pollos y gallinas debido a que, frecuentemente, contiene residuos antibióticos.

El sector avícola en nuestro país supone algo más del 10% de la producción final de la ganadería

nacional. España cuenta en la actualidad con más de 6.500 cebaderos de aves cuya producción alcanza la cifra de 550 millones de unidades al año. Además, no hay que olvidar las cifras aportadas por la avicultura, que sitúan un número medio de aves ponedoras en cuarenta millones al año. La generación de residuos se estima en 150 g de residuo por gallina y día.

Estos datos confirman la existencia de un problema grave de contaminación, ya que la generación de millones de toneladas de gallinaza, presentan un importante problema medioambiental debido a su alto nivel de toxicidad. Si bien, estos pueden ser utilizados directamente como abonos debido a su alto contenido en nitrógeno, fósforo y un excesivo vertido de los mismos puede ocasionar importantes riesgos de contaminación, produciendo efectos negativos en el entorno que es utilizado.

Respecto a la composición de la gallinaza, es una tarea realmente complicada debido a la variabilidad con la que se pueden presentar los residuos de excrementos de animales. En primer lugar influirá el tipo de animal, pero además lo hará el tipo de alimentación del mismo, así como su edad, el clima, etc. Gran parte del nitrógeno, fósforo y potasio que son ingeridos por los animales estarán presenten en sus residuos. Para el porcino estos valores son del 76%, 83% y 86%, respectivamente. De esta forma se hace referencia a la capacidad digestiva del animal, ya que en caso de aparecer el 100% del elemento en el residuo se podrá asumir que nada es retenido y, por tanto, asimilado. En la gallinaza este fenómeno es agudo. Los valores para el N, P y K son de alrededor de 81%, 88% y 95%, respectivamente, lo que indica claramente el pobre rendimiento digestivo de estos animales.

El contenido en humedad es variable según la explotación y el tipo de cama. Sin embargo, valores del 20% se aceptan como normales. Tiene un contenido en azufre superior al 1%, lo que supone que, en caso de valorización energética, va a dar lugar a gases ácidos. En caso de apilamiento se transforma en ácido sulfhídrico, debido a las transformaciones anaerobias, tal como acontece en los criaderos.

El mayor problema es, sin duda, el olor. La gallinaza fresca contiene una serie de compuestos (tales como el H_2S y algunos compuestos orgánicos) que causan un verdadero perjuicio a las personas que habitan en las proximidades.

Más genéricos son los problemas que los residuos de gallinaza producen en el medio ambiente. Estos efectos se dividen en tres bloques: los causados a la atmósfera, los causados a los suelos y, finalmente, los causados a las aguas:

- Atmósfera: malos olores, gases asfixiantes, gases irritantes, desnitrificación, aerosoles.
- Suelo: variación de pH, efectos depresivos, salinidad, metales pesados, patógenos, exceso de nitratos y nitritos, retención de agua.
- Aguas: lixiviación, carga orgánica, eutrofización, patógenos y fecales.

En un periodo en el que la búsqueda de alternativas energéticas ocupa un papel protagonista en las políticas globales de los estados industrializados, es preciso encontrar soluciones que sean capaces de integrar las nuevas tecnologías con las necesidades en busca del correcto camino hacia el desarrollo sostenible. La gallinaza tiene un poder calorífico del orden de 13,5 MJ/t (3.200 kcal/kg). Es decir, un PCI nada despreciable que induce a la valorización energética.

El proceso de valorización energética de la gallinaza más conocido consiste en un ciclo simple de vapor, ciclo Rankine, constituido básicamente por una caldera de combustión equipada con parrilla y un grupo turboalternador de vapor a condensación.

La energía química contenida en el residuo se convierte en energía térmica mediante su combustión. El calor generado a partir de la combustión del residuo será transferido a un fluido agua-vapor, de forma que se calienta el agua, se evapora y se sobrecalienta el vapor generado.

Este vapor sobrecalentado a alta presión será inyectado a una turbina de vapor donde su expansión provocará la transformación de la energía térmica en energía mecánica que hace mover de forma circular los alabes de una turbina, que transforma a su vez ésta en electricidad.

En este sistema es necesario disponer de un foco frío o condensador que puede ser por medio de aerorrefrigeradores, o a través de una torre de refrigeración de tipo forzado.

En Suffolk (Reino Unido) se construyó una planta que trata 130.000 t/año de gallinaza y genera 12,7 MW de electricidad. En el mismo país se han construido en 1995 otra planta que genera 13,5 MW (Glanford) y en Thetford otra mayor de 38,5 MW de potencia eléctrica. Es decir un rendimiento, aproximado, de 1MW(e)/t de gallinaza.

4.2.1.3. Los guanos

Los guanos de aves, del Perú y Mozambique, provienen de acumulaciones de deyecciones de aves marinas, y constituyen excelentes abonos orgánicos naturales, libres de todo tipo de contaminación.

Se trata de estiércoles extremadamente concentrados y por tanto deben emplearse en dosis muy moderadas (menos de 1 t/ha).

4.2.3. Las algas

El término de alga comprende un grupo muy heterogéneo de organismos vegetales marinos (50.000 aproximadamente) que se caracterizan por realizar la fotosíntesis, es decir el proceso que convierte la energía lumínica en energía química necesaria para la síntesis de moléculas orgánicas.

Aunque la mayoría de las algas son unicelulares y microscópicas, algunas de 1 o 2 micrómetros de diámetro (1 micrómetro = 0,001 milímetros). Muchas son visibles como el verdín de las charcas, las algas marinas, la marea roja, las manchas verdeazuladas de las paredes de los acuarios, las capas verdes sobre los árboles o la nieve roja. Muchos géneros de algas tienen representantes que viven en simbiosis con hongos y forman los líquenes. Ciertas algas han evolucionado hacia la pérdida de su capacidad fotosintética. Las algas se diferencian de los briofitos (musgos y hepáticas), que también carecen de tejidos complejos, en que sus células reproductoras se originan en estructuras unicelulares y no pluricelulares. El estudio de las algas se llama ficología (del griego, *phykos*, que significa «alga de mar») o algalogía (del latín, alga).

Las formas de algas macroscópicas suelen fijarse a una superficie firme y crecen en abundancia como algas marinas en las zonas intermareal y submareal, a una profundidad de hasta 270 metros, según la penetración de la luz solar. También crecen sobre rocas que se encuentran en agua dulce estancada o corriente y, por lo general, se desprenden y flotan formando el verdín de las charcas. Las formas de algas microscópicas son en su mayoría unicelulares y planctónicas (móviles, o que flotan libremente) y constituyen una parte esencial de la cadena alimentaria de todos los seres acuáticos.

Las causas por las que su estudio es motivo de profundización son:

- Presentan un rápido crecimiento.
- Son relativamente resistentes a los cambios ambientales.
- Posibilidades de crecer en aguas contaminadas.
- Posibilidades de su cultivo para usos energéticos (una vez secas tienen un PCI semejante a un carbón bituminoso).
- Alto poder nutritivo, algunas con gran contenido en proteínas (hasta 35 t de proteínas/ha).

En caso de su valorización con fines agrícolas, deben usarse en el estado más fresco posible, y para acelerar su descomposición se les puede añadir estiércol u otro abono orgánico rico en nitrógeno.

Comparándolas con los estiércoles, son más pobres en fósforo y nitrógeno, aunque más ricas en potasio, sodio y magnesio, y disponen de una gran cantidad de oligoelementos, entre los que cabe destacar el zinc, el hierro y el cobre. Así su composición media es:

N	0,20-0,80%
P_2O_5	0,05-0,20%
K_2O	1,00-3,00 %

Las dosis empleadas normalmente son de 30-40 t/ha.

En el comercio también pueden encontrarse harinas y extractos líquidos de diversos tipos de algas, entre los que destaca el alga calcárea (*Lithothamnium calcareum*) como *Lithothamne,* o *Algomin* (en Alemania) que se recolecta a lo largo de las costas marinas del oeste de Francia. Esta alga es muy rica en calcio (42-47% de CaO), magnesio (3-8% de MgO) y oligoelementos, y se utiliza pulverizada, sola o mezclada con fosfatos naturales, en la enmienda de suelos ácidos a dosis de 0,1-0,6 t/ha. Con cantidad tan importante de CaO se podría pensar en su valorización como materia prima para el clínquer.

Para resaltar la importancia de las algas en el contexto de la biomasa total, vale la pena recordar que:

- Los océanos cubren el 70 por ciento de la superficie de la Tierra.
- Más del 90 por ciento de la biomasa viviente del planeta se encuentra en los océanos.
- La muerte y las enfermedades causadas por las aguas costeras contaminadas tienen un costo de 10.000 millones de euros para la economía mundial. El impacto económico anual de la hepatitis causada por alimentos marinos contaminados asciende a 6.000 millones de euros.

- La proliferación de algas nocivas debido a un exceso de nutrientes, principalmente el nitrógeno proveniente de los fertilizantes utilizados para la agricultura, ha creado casi 150 «zonas muertas» costeras desoxigenadas de una superficie de 1 a 70.000 kilómetros cuadrados.
- La contaminación, las especies exóticas y la alteración de los hábitats costeros representan una amenaza creciente para importantes ecosistemas marinos como los manglares, los lechos de zosteras, las algas marinas y los arrecifes de coral.

Las algas y sus derivados forman parte de vida cotidiana en alimentos, fármacos, pinturas y tejidos. Las algas son fuente de muchos productos útiles. Tal es el caso de los ficoloides o hidrocoloides polisacáridos, que son unos polisacáridos complejos obtenidos de las algas *Phaeophyceae (feofitas*) y *Rhodophyceae* (rodófitas), que forman sustancias coloidales cuando son dispersadas en agua. Los polisacáridos recuperados de algas más importantes son: alginatos, agar, laminarina, fucoidina, galactanos y carragenina, que tienen diversos usos. Por sus aplicaciones, de estos polisacáridos destacan los alginatos y el agar.

Los alginatos son usados para hacer impresiones dentales, y como excipientes de medicinas que deben ser lentamente absorbidas por el cuerpo. Son empleados para emulsionar fármacos y también son ampliamente utilizados en la industria alimenticia. El alginato de sodio es considerado el mejor coloide usado como estabilizador y agente cremoso.

Otro polisacárido que tiene de origen a las algas es el agar. Aparte de los derivados del ácido algínico, la producción de agar es considerada la otra gran industria basada en el uso de algas. El agar es un polisacárido muy complejo, que en realidad es la mezcla de dos polisacáridos, agarosa y agaropectina. El agar seco es insoluble en agua fría y soluble en agua caliente. Diluido en agua (en dilución del 1 al 2%), forma un gel que a una temperatura menor a 35 ℃ es un sólido y en una temperatura mayor a 50 ℃ se hace líquido. El agar es utilizado en la microbiología como medio cultivo por que tiene la propiedad de no poder ser digerido ni atacado por los microorganismos cultivados y como ingrediente principal en la elaboración de conservas de carne y pescado, evitando el desagradable «sabor a lata». También es usado como emulsionante de la mayoría de los laxantes en el mercado. Es muy usado en la industria textil, ayudando a dar forma a la tela y así garantizar la talla. Las películas fotográficas usan el agar como aglutinante de los polvos receptores de luz. El agar es incluso usado para la elaboración de ciertos pegamentos y pinturas, como óleos.

4.2.3.1. Clasificación de las algas

Los ficólogos definen a las algas como organismos fotosintéticos con clorofila A y con estructura no diferenciada en raíces, tallo u hojas como las plantas vasculares. Se clasifican en 11 grupos con categoría, de las cuales vale la pena destacar:

1. *Cianofíceas* (algas verde-azuladas): Son organismos procariotas fotosintéticos que poseen clorofila A. Están más próximos a las otras bacterias fotosintéticas que a algas eucariotas por lo que también se les denomina cianobacterias. Entre las que tienen uso biotecnológico destaca *Spirulina* que se emplea como alimento por su alto contenido en proteínas (hasta el 70% del peso seco).

2. *Rodofíceas* (algas rojas). El color pardo-rojizo viene dado por la existencia de biliproteínas (*ficoeritrina* y *ficocianina*, principalmente) que contribuyen a enmascarar el color verde típico de la clorofila. Las algas rojas son organismos eucariotas, es decir que tienen membrana nuclear y, por regla general, están confinadas a hábitats marítimos. Algunas son de gran belleza y, como los cianofitos, carecen de clorofila B y tienen pigmentos especiales rojos y azules. La mayoría se caracteriza por la presencia de puntos de conexión entre sus células que resultan de una división celular incompleta.

Las paredes celulares de ciertas algas rojas son la única fuente de donde se extraen dos carbohidratos polisacáridos de gran importancia económica: el agar y el carraguín. Ambas sustancias están químicamente relacionadas y tienen propiedades suspensivas, emulsionantes, estabilizantes y gelidificantes. El agar es conocido por su uso en la preparación de los medios de cultivo para los microorganismos; el carraguín por su empleo en la fabricación de productos lácteos, aunque también se usa en la industria textil, en cosmética, en farmacia y en tipografía. Varias algas rojas, de las cuales la más conocida es el *nori*, son importantes en la dieta de algunos pueblos, especialmente en Japón.

3. *Feofíceas* (algas pardas): Las algas pardas, como las algas rojas, se encuentran principalmente

en hábitats marinos. La coloración parda, de tonalidad muy variable, es debida a la presencia de ciertos pigmentos carotenoides (fucoxantinas). También carecen de clorofila B; además de clorofila A poseen clorofila C. Las algas pardas se caracterizan por su crecimiento rápido, su inmenso tamaño y por sus tejidos relativamente complejos.

En la pared de algunas especies se encuentran coloides denominados alginatos; además muchas algas pardas poseen también interés agropecuario, en la alimentación humana, farmacología y cosmética. El alginato, un polisacárido que se obtiene de los feofitos, se usa y comercializa del mismo modo que el agar o el carraguín. Las algas pardas son también fuente de vitaminas y minerales y se utilizan como fertilizantes. Algunas especies (como el *kobu*) constituyen un aporte alimenticio importante, especialmente en la comida japonesa.

4. *Clorofíceas* (algas verdes). Las algas verdes se asemejan a las plantas superiores en que tienen clorofila A y B y almidón como material de reserva. La mayoría son unicelulares o coloniales y constituyen una parte importante del plancton de los hábitats de agua dulce. Muchos clorofitos unicelulares se agrupan en filamentos y son visibles como musgo de río o verdín de charca. Las algas verdes de agua dulce más evolucionadas son las carofíceas. En hábitats marinos las más desarrolladas se componen de sifones plurinucleados y alcanzan una longitud de 10 metros. Un género tiene las paredes celulares impregnadas con una forma de carbonato de calcio llamada aragonita y contribuye de modo importante a la formación de los arrecifes de coral. Algunos estudios indican que, probablemente, las carofíceas y otros clorofitos evolucionaron hacia los briofitos y las plantas superiores.

Las algas verdes tienen una enorme importancia en la cadena alimentaria, es decir, constituyen una fuente de alimento para otros organismos acuáticos (plancton); además contribuyen al aporte de oxígeno atmosférico. Sin embargo, pueden tener efectos negativos cuando la población aumenta demasiado porque provocan mal olor y sabor desagradable en el agua potable y obstruyen los filtros de las depuradoras. En lagos y charcas de agua dulce contaminada por nitratos y fosfatos, la población de algas crece rápidamente hasta llegar al máximo. Por este motivo aparece en el agua una espuma densa y maloliente y se produce un drástico descenso del oxígeno disponible, necesario para otras formas de vida acuática.

Los ficocoloides tienen menos interés que el de algas rojas y pardas pero estas algas tienen otros usos: agropecuario, alimentación humana, sistemas de regeneración ambiental (depuración de efluentes) y en la industria farmacéutica.

4.2.3.2. Aplicaciones de las algas

Actualmente las algas tienen usos industriales, agropecuarios, alimentarios, médico-farmacológicos y en restauración medioambiental. La cantidad de algas transformadas en todo el mundo es del orden de siete billones de toneladas de peso fresco, siendo los países asiáticos los productores de casi el 80% de las materias primas.

En España, los agricultores del norte y noroeste han empleado algas como abono de las tierras de cultivo, en algunos lugares se han consumido y finalmente existen industrias de extracción de agar muy importantes a nivel mundial

Usos industriales: ficocoloides

De las paredes de las algas rojas se extraen los polisacáridos agar y carragenatos, mientras que de la de algas pardas se extraen los alginatos.

El agar se emplea en la elaboración de medio de cultivo en laboratorio por tener un gran poder gelificante a temperaturas de 34-38 ℃ (agar extraído de *Gelidium*) y 40-52 ℃ (agar extraído de *Gracilaria*) lo que permite añadir los organismos que se quieren cultivar de un modo homogéneo. El agar se puede esterilizar a temperaturas superiores a 100 ℃ sin que pierda el poder gelificante.

El agar se añade como aditivo gelificante y espesante (Código E-406) en gran cantidad de alimentos (confituras, merengues, helados, etc.). También se emplea en la industria fotográfica (estabiliza la nitroglicerina), industria biotecnológica (agarosa para separaciones cromatográficas y electroforéticas). Las especies más empleadas en la extracción de agar pertenecen al género *Gelidium, Pterocladiella, Gelidiella y Gracilaria*.

Los carragenatos, son poligalactanos, polímeros lineales de moléculas alternadas de D-galactosa y 3-6 anhidro-D- Galactosa unidas por enlace a 1-3 y b 1-4. El carácter hidrofílico y la solubilidad lo dan los grupos sulfatados en las moléculas de galactosa. Las propiedades espesantes y gelificantes las hacen muy útiles en la industria alimentaria. El 80% del carreganato extraído en el mundo se emplea como espe-

sante y agente estabilizante (E-407), en productos lácteos, postres de tipo gelatina, jugos de fruta, mermeladas, helados etc. Otros usos se hallan en cosmética (pasta de dientes, barras aerosoles) e industria farmacológica (contra úlceras gástricas e infecciones víricas). Se usan unas 15 especies en la extracción de carragenatos destacando *Chondrus crispus, Mastocarpus stellatus, Euchema sp.* Esta última se cultiva en Filipinas e Indonesia y contribuyen con un 80% de la producción mundial.

Los alginatos son polisacáridos constituidos por unidades de b-D-manurónico y a-L-Gulurónico. Disueltos en una pequeña cantidad de agua tienen un gran poder espesante, gelificante y estabilizante. El 50% del alginato extraído se emplea en la industria textil, un 30% en la industria alimentaria con los códigos: E-401, E-402, E-403, E-404, E-405 y E-405, ya que aportan textura y consistencia evitando la formación de cristales de hielo, el resto se usa en la industria de la celulosa (para suavizar la superficie del papel), industria farmacéutica (excipientes y preparación de apósitos) e industria cosmética (jabón, champús, barras de labios, espumas de afeitar). De las 300 especies potencialmente útiles se utilizan unas 12, destacando *Macrocystis pyrifera, Laminaria hyperborea, Laminaria digitata, Saccorhiza polyschides, Ascophyllum nodosum* y *Fucus sp*.

Usos agropecuarios

Las algas han constituido una fuente de abono para las tierras de cultivo. Al margen de esta misión, las algas mejoran las características nutritivas del suelo e impiden el crecimiento de malas hierbas. Se emplean también como complemento en la dieta del ganado. Actualmente hay empresas que fabrican harinas de algas para ser suministradas al ganado.

Por último se han desarrollado fertilizantes basados en extractos líquidos de algas ya que se ha probado que aumentan la resistencia de los cultivos a las heladas y plagas y además estimulan el crecimiento y producción vegetal.

Usos alimentarios

Son apreciadas por sus propiedades nutritivas y características organolopédicas. Algunas algas poseen características nutritivas de gran interés en comparación con vegetales terrestres.

Usos farmacológicos

La aplicación en la medicina tradicional es muy común en el sudeste asiático. En la industria farmacológica su uso está relacionado con su poder gelificante, sin embargo también se han encontrado actividad antitumoral, antioxidante, antiúlceras, etc.

Se ha demostrado que una dieta rica en *Porphyra tenera* reduce la incidencia de tumores intestinales y cáncer de mama en animales de laboratorio. Esta propiedad parece estar relacionada con el contenido de ésteres y con el contenido en vitamina A y betacaroteno. Por otro lado reduce el nivel de colesterol siendo la sustancia activa la b-homobetaina.

La utilización terapéutica de las algas está extendida en homeopatía: así, el musgo de irlanda (*Chondrus crispus*) produce una gran cantidad de mucílago que le confiere propiedades emolientes, laxantes y expectantes, y contra el estreñimiento crónico. Los extractos de laminaria (*Laminaria sp*.) dilatan los conductos del organismo (p.e. cuello del útero), y el sargazo vejigoso (*Sargassum sp. Fucus vesiculosus*) combate paperas, infartos glandulares, la gota y la obesidad. Se está investigando la eficacia de las algas contra ciertas afecciones y enfermedades: trombosis, colesterol, trastornos gástricos y vesiculares, astenias, reumatismo y espamofilia.

Usos cosméticos

Las aplicaciones cosméticas son las más conocidas. Se emplean en cremas, mascarillas, champúes, lociones, etc. La acción benéfica de las algas se manifiesta sobre todo en el tratamiento de uñas rotas, acné, caída del cabello, antiarrugas, seborrea y barros.

También constituyen un excelente complemento en las curas de rejuvenecimiento de la piel o incluso contra la obesidad y la celulitis. Actualmente está creciendo su uso en dietética y talasoterapia.

Usos en restauración medioambiental y acuicultura

Actualmente se investiga el uso de las algas en la depuración de efluentes de piscifactorías cargados de compuestos de nitrógeno (amonio y urea) y carbono que al ser consumidos por las algas reducen la eutrofización de aguas costeras. Por otro lado también se están desarrollando sistemas de poliacuicultura integrada en el que las algas crecidas en efluentes de granjas de cultivo de peces o moluscos sirven de complemento dietético para los propios animales.

Usos enegéticos

En el sur de la costa Argentina se han descubierto unas algas de aplicación energética. Una hectárea de soja produce 400 litros de aceite, mientras que estas algas, en igualdad de superficie, pueden producir mas de 100.000. Es decir una productividad 250 veces superior sin interferir en un doloroso debate ético que cuestiona el destino de plantas alimenticias, soja, a la fabricación de biocarburantes.

4.3. GENERACIÓN DE RESIDUOS DE LA INDUSTRIA FORESTAL

De una manera análoga a los cultivos agrícolas, existe una dispersión importante en la generación de biomasa forestal residual, ya que plantaciones forestales de una u otra especie, o bosques naturales multiespecíficos, poseen características propias de estructura y crecimiento, que condicionan la cantidad de biomasa disponible en los bosques.

La utilización de biomasa residual de origen forestal posee un potencial mayor en plantaciones, sin perjuicio de la biomasa que puede ser aportada desde un manejo forestal sustentable de bosques naturales, donde a partir de cortas intermedias, programadas por especialistas se pueda extraer pequeños volúmenes.

Las importantes reservas en los bosques naturales, que desde siglos pasados han sido fuentes energéticas principalmente por el uso de leña como combustible, con bajos rendimientos energéticos, han visto amenazadas su existencia por la sobreexplotación no racional de extensas zonas, que luego se degradan y pierden el potencial productivo.

Los parámetros de disponibilidad de la materia prima deben responder a las características de la especie forestal que se utilizará como fuente principal de biomasa y también al origen que ésta tenga, ya que puede provenir tanto de plantaciones con fines energéticos, como de residuos de procesos industriales o de explotación maderera en los bosques. La explotación de un bosque genera un cantidad de residuos importante, ya que buena parte de un árbol que es cosechado corresponde a secciones no aprovechables desde el punto de vista de la industria forestal y es abandonado muchas veces como residuo en los propios bosques. Si bien hay implicaciones en ciclos de nutrientes, una parte de esta biomasa que queda alojada en el suelo forestal, puede ser extraída del bosque y ser aprovechada como energía. Este material leñoso corresponde principalmente a ramas, hojas y secciones de diámetro menor del tronco, pero pueden alcanzar un porcentaje importante del volumen total de un árbol y por ende del volumen total de un bosque. Si bien los inventarios de biomasa total aún no son tan extendidos en el campo de la actividad forestal, existen en la actualidad proyectos que buscan desarrollar fórmulas matemáticas que permitan estimar con mayor exactitud el volumen total de un bosque. Hasta ahora lo que interesaba a la industria era el volumen comercial que posee un árbol, es decir, descontando todos los residuos que se generan al extraerlo desde el bosque. Es posible establecer la composición genérica que caracteriza un árbol promedio, donde el mayor porcentaje de la biomasa total corresponde al tronco, esta estimación promedio se presenta en la Tabla 10.21.

Tabla 10.21. Composición promedio de un árbol

Sección del árbol	% de volumen total
Tronco	67
Ramas	16
Hojas	3
Tocones	14
Total	**100**

Es posible establecer, en una región mediterránea, plantaciones de especies de *pinus sp.*, aproximadamente con un 16% de volumen aprovechable energéticamente, correspondiente a residuos de los procesos de extracción. Además se estima que un 5% del volumen es biomasa residual que permanece al bosque y se incorpora al ciclo de nutrientes. Este último aspecto es importante de analizar ya que puede presentar algunas alternativas de aprovechamiento sin dejar de lado la nutrición del suelo forestal, pero considerando, por ejemplo, algunos beneficios que pueden obtenerse al despejar superficies importantes de terreno que ciertos meses del año se transforman en focos de frecuentes incendios forestales, ya que se trata de gran cantidad de materia orgánica que con las altas temperaturas de la época estival se puede inflamar fácilmente y afectar seriamente las condiciones edáficas y biológicas del lugar.

Si se considera la productividad de un bosque de *pinus sp.* promedio, de unos 300 m^3/ha a la edad de cosecha, en una zona mediterránea, alrededor de 48 toneladas de biomasa residual por hectárea es posible obtener recolectando sólo la biomasa rema-

nente de las actividades de cosecha forestal. A esto es posible agregar de 40 a 50 toneladas de biomasa residual que puede ser obtenida de las cortas intermedias del bosque.

Es necesario considerar la temporalidad de las rotaciones de cultivos forestales, ya que especies de rápido crecimiento pueden tener ciclos productivos de 15 a 25 años, y especies de lento crecimiento, pero con mayor biomasa acumulada en el bosque, pueden alcanzar ciclos de 90 a 120 años.

4.3.1. Pelets y briquetas

En los últimos tiempos la industria de producción de biomasa densificada ha experimentado un gran auge, en particular la fabricación de pelets. Ello se debe a la aparición de estufas domésticas e industriales de pequeño tamaño diseñadas para consumir estos prefabricados, ya que permiten unas buenas condiciones de almacenaje y alimentación automática del combustible, así como la extracción de cenizas (suele ser del 1 al 1,5%). En el caso de España, el poco desarrollo de esta industria se atribuye a la escasez de viruta y aserrín generada en las plantas que fabrican palets para embalaje.

La biomasa sólida, tal y como se obtiene en origen, no presenta características adecuadas para aplicaciones energéticas como las comentadas en el párrafo anterior: baja densidad física y energética, contenido variable de humedad y falta de homogeneidad. Aquí es donde aparece el interés de la densificación, con o sin aditivos. Una ventaja muy importante de la biomasa densificada es la conservación de la misma con el tiempo: no se degrada.

Se suele hacer una distinción entre briquetas que pueden tener formas geométricas variadas (diámetro de 30 a 200 mm y longitud de 150 a 500 mm, si bien también las hay de secciones poliédricas) en función de la máquina que las produce y los pelets que tienen forma de cilindro (diámetro de 6 a 30 mm y longitud de 10 a 70 mm). En general las briquetas tienen un mercado reducido para las aplicaciones domésticas.

Para la fabricación de briquetas se precisan presiones del orden de 100 Mpa, que conduce a un calentamiento de la masa entre 100 y 150 ℃, lo que provoca la plastificación de la lignina, por lo que normalmente no es necesaria la adición de otros aglomerantes. La humedad está limitada entre el 8 y el 15%. La densidad final obtenida oscila de 900 a 1.400 kg/cm^2.

Por lo general, la peletización es un proceso de granulado por extrusión. Durante este proceso la fricción genera un calentamiento, del orden de 70 ℃, que se utiliza para la aglomeración. La distribución granulométrica de la materia prima es fundamental: el polvo no es adecuado pero las partículas tampoco pueden ser muy grandes ya que perjudican la cohesión. La humedad debe ser del 8 al 15%.

Los pelets presentan una densidad aparente (para el transporte) del orden de los 600-700 kg/cm^2.

En España a excepción de Andalucía y Castilla y León, el uso industrial de la biomasa forestal es, en la práctica, nulo. Para dar una idea del desfase, mientras Suecia consume 1.250.000 t/año en forma de pelets, España no llega a las 40.000 t/año. En Suecia, el precio de pelets sobre camión esta alrededor de 140-170 €/t, en *big-bags* de 160-180 €/t y en sacos de 50 kg de 200-260 €/t. En contrapartida, la Comunidad Autónoma Gallega (España) ha declarado, en 2006, una disponibilidad de 995.000 t/año de residuos forestales en condiciones sostenibles, sin que se tenga conocimiento de aprovechamiento alguno, en cambio, lamentablemente si han sido noticia los devastadores incendios forestales.

4.4. FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

Los residuos sólidos urbanos (RSU) poseen alrededor de un 40% de materia orgánica, de la cual parte importante es valorizable a través de procesos de conversión. Los RSU pueden ser valorizados energéticamente a través de la incineración o gasificación. Este proceso se integra generalmente con una etapa de clasificación de los residuos donde son extraídos los residuos inertes, metálicos, vidrio e industriales, los cuales son normalmente incorporados a procesos de reciclaje. La fracción restante, compuesta principalmente por residuos orgánicos, se lleva al horno incinerador donde se oxida y se recupera la energía en forma de calor.

Otra alternativa es el compostaje, siendo uno de los procesos de valorización de residuos orgánicos más utilizados en la actualidad. Este proceso permite la obtención de un sustrato rico en nutrientes que puede ser utilizado para mejorar la calidad de suelos agrícolas o forestales, nutriendo cultivos y permitiendo la valorización de residuos, que difícilmente pueden tener otro uso. Esta variante es sólo recomendable a partir de la fracción fermentable recogida selectivamente.

Aproximadamente la tasa de generación de RSU en un país como España es de 1,5 kg/persona/día, con lo cual la cantidad de residuos orgánicos producidos diariamente es de gran magnitud y permite el establecimiento de numerosas instalaciones dedicadas a su tratamiento.

Efectuando un cálculo simple a partir de la generación media de RSU en una ciudad europea, es posible realizar una estimación del potencial aprovechamiento de la fracción orgánica de los RSU. Si un 40% de los residuos generados son materia orgánica susceptible de ser valorizada, en una ciudad de 1 millón de habitantes, se generaría un total de 600 toneladas de materia orgánica. La tecnología disponible hoy en día permite obtener alrededor de 330 litros de etanol a partir de una tonelada de residuos orgánicos, por lo que en una ciudad de 1 millón de habitantes potencialmente podría producirse un total de 198.000 litros diarios de bioetanol lo cual significa mas de 72 millones de litros anualmente. Este combustible es el suficiente para cubrir las necesidades de combustibles de 160.000 personas.

Otra alternativa es la valorización energética a través de la incineración de los RSU, lo cual posee un costo elevado, pero permite obtener aproximadamente 450 kWh de electricidad por tonelada de residuos, con un costo de producción de alrededor de 0,16 € por kWh.

5. Impacto ambiental del aprovechamiento de los residuos agrícolas y forestales

La valorización energética de residuos agrícolas y forestales, así como el establecimiento de plantaciones de especies vegetales como cultivos energéticos suponen una serie de beneficios que han sido nombrados en los apartados anteriores. Principalmente su aporte a la sustitución de combustibles fósiles, la generación de alternativas productivas en zonas rurales y la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero son, sin lugar a duda, beneficios significativos desde el punto de vista ambiental, social y económico.

También es obvio que la utilización extensiva de biomasa para su aprovechamiento energético produce efectos sobre los sistemas naturales, pudiendo alterar procesos biológicos con la consecuente afectación al medio ambiente. El primer y principal impacto ambiental que podría pensarse al proponer la utilización de biomasa es la explotación misma de los recursos, si bien este apartado no incidirá en este aspecto sino en los problemas derivados de su valorización, que se asocian principalmente a tres cuestiones claves: emisiones a la atmósfera, utilización del suelo y balance energético.

5.1. EMISIONES CAUSADAS POR EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LA BIOMASA

La emisión de gases contaminantes a la atmósfera, la emisión de partículas y de hidrocarburos volátiles, son los principales efectos ambientales asociados a proyectos de obtención de electricidad a partir de biomasa, dentro de los cuales la formación de compuestos aromáticos policíclicos (PAH's), algunos de los cuales, particularmente los de mayor peso molecular, son potentes agentes carcinogénicos. Este es uno de los impactos más preocupantes.

Trabajos realizados sobre la presencia de dioxinas y furanos en las emisiones de combustión de la biomasa han podido determinar que las concentraciones de estos compuestos son muy pequeñas, situándose, por lo general, en niveles unas 100 veces inferiores a las permitidas por la legislación vigente en la Unión Europea para incineradoras de RSU. De todas maneras, las instalaciones productivas modernas poseen un detallado control de emisiones y contemplan el uso de filtros de partículas y la depuración de los gases de combustión. Sin embargo, son muy importantes las emisiones de organoclorados en los incendios forestales.

Por otra parte, emisiones de partículas y CO pueden representar graves problemas de contaminación atmosférica, si bien sus repercusiones pueden ser menores a los producidos en instalaciones homólogas con combustibles fósiles. Las medidas de abatimiento y control de estas emisiones deben ser consideradas en todo aprovechamiento industrial que se pretenda realizar a partir de la valorización de biomasa como fuente energética. Estudios llevados a cabo por la Agencia Danesa del Medio Ambiente han podido constatar la estrecha relación existente entre la aparición de dioxinas y PAH's, con los ni-

veles de CO en las emisiones. Dicho Organismo recomienda mantener la concentración de CO en los gases de combustión de biomasa por debajo de un 0,05% en volumen (para un 10% de exceso de oxígeno en los gases secos), asegurando de esta forma la casi desaparición de los compuestos que generarían problemas.

Las emisiones de CO_2 de las plantas generadoras de electricidad a partir de biomasa no poseen importancia, puesto que en términos absolutos el balance general es cercano a cero, ya que se espera que el carbono liberado a la atmósfera sea capturado nuevamente para su inserción en el ciclo de fijación a través de la fotosíntesis y sólo existe una tasa de emisiones asociada a labores anexas del proceso de combustión propiamente, tal por ejemplo el trasporte, la construcción de las instalaciones o la fabricación de los insumos productivos. El CO_2 no es considerado un contaminante y sólo posee efectos a nivel global por su implicación en el efecto invernadero.

En cualquier caso, las emisiones gaseosas originadas por la combustión directa de la biomasa hay que analizarlas en función de parámetros tales como la composición del biocombustible utilizado y, sobre todo, la tecnología de combustión y la eficiencia energética de las plantas térmicas. En este sentido, estimaciones de valores promedios de emisiones asociadas a grandes centrales de biomasa, son presentadas en la Tabla 10.22, donde se contraponen las emisiones de la combustión de dos de los biocombustibles más utilizados con las producidas por un carbón de buena calidad y contenido moderado de azufre, la gasolina y el diésel bajo en azufre.

Tabla 10.22. Emisiones de diferentes combustibles fósiles en relación a la biomasa, antes y después de los sistemas de depuración más comunes (García, 1998)

Combustible	SO_x como SO_2 (g/GJ)	NO_x como NO_2 (g/GJ)	Partículas (g/GJ)
Carbón	584	200	1.100*-120 C
Diesel	495	150	60*
Gasolina	90	100	0,5*
Gas natural	0	150	0
Paja	130	130	1.100*/800 C
			20 B
Madera	130	130	500*/300 C
			20 B

Emisiones a la salida de: caldera (*), ciclón (C) y electrofiltro (B).

El contenido en partículas de los gases a la salida de caldera, en el caso de la biomasa, presenta valores más altos incluso comparables a los del carbón, aunque la instalación de sistemas de control y abatimiento de contaminantes permite la reducción en más de un 98%. Las partículas generadas dependen directamente del contenido de cenizas del biocombustible y por lo tanto los valores son fácilmente estimados a partir de la composición elemental de cada combustible. También son muy dependientes de la concepción del horno ya que según el diseño se facilita el arrastre de partículas.

Respecto a óxidos de nitrógeno, responsables junto al dióxido de azufre de la lluvia ácida y de una parte significativa del efecto invernadero, las emisiones por unidad de energía producida a partir de la combustión de biomasa son algo superiores a las de la gasolina, comparables a las del gas natural y el diésel y netamente inferiores a las del carbón. Dichos valores también son cuantificables al conocer la cantidad de nitrógeno presente en la biomasa. Estas cifras, no obstante, son tan sólo indicativas y no generalizables a la totalidad de los casos, debido a la gran diversidad en la composición de los combustibles existentes y a las condiciones de operación de las plantas térmicas. En términos generales se pueden estimar los rangos de emisiones de NO_x para los distintos tipos de biocombustibles utilizados que muestra la Tabla 10.23.

Tabla 10.23. Emisiones de NO_x de diversos biocombustibles (Koch, 2005)

Combustible	Emisión de NO_x (mg/Nm^3)
Madera	100-250
Biomasa herbácea	250-520
Astillas de madera	500-900

Referente al SO_2 el contenido de este elemento por unidad de energía en el biocombustible es muy pequeño, generalmente inferior a 60 g/GJ de combustible. La biomasa produce emisiones específicas de SO_2 muy inferiores a combustibles como el carbón. El origen de SO_2 procede del contenido de azufre en la biomasa (se forma SO_2 por la combustión del azufre de la biomasa y el oxígeno del aire), pero el contenido de azufre en la biomasa es relativamente bajo si se compara a un combustible tradicional como el carbón. Normalmente no se requieren medidas particulares para eliminar el SO_2 cuando se

combustiona biomasa, ya que gran parte del SO_2 se queda en el sistema de eliminación de partículas (40-90% del total).

Es posible afirmar que, en términos generales, con la tecnología disponible, la combustión de biomasa en grandes centrales no representa problemas de relevancia en lo que a cumplimiento de normativa de emisiones se refiere y que un buen control de las condiciones de proceso en combinación con la existencia de elementos filtrantes comunes tales como ciclones y electrofiltros o filtros de mangas, son suficientes para, en general, asegurar una combustión limpia, con unos niveles globales de emisiones muy inferiores a los del carbón, incluso el de buena calidad, y el petróleo.

De la experiencia alemana en este sentido se pudo recopilar, ver Tabla 10.24, la siguiente información que muestra las emisiones para la generación eléctrica a pequeña escala en una situación en particular.

Tabla 10.24. Emisiones típicas de una planta de generación de biomasa (Koch, 2005)

Potencia térmica instalada	Combustible	Emisiones (mg/Nm³)		
		SO_2	NO_x	Partículas
5 MW	Astillas de madera	50-500 (media: 170)	100-400 (media: 250)	200-800 (media: 500)

Las emisiones referidas al aprovechamiento térmico de la biomasa son análogas a las de cualquier instalación industrial, pero si se comparan con los resultados aparecidos en la Tabla 10.23, existe una reducción significativa de las emisiones por unidad producida de energía. Además de las emisiones referidas, la combustión de la biomasa, análogamente a lo que ocurre con los combustibles fósiles, produce otros efluentes de naturaleza líquida y sólida.

Entre los primeros se encuentran los líquidos que resultan de la limpieza de los gases de combustión por métodos húmedos antes de su salida a chimenea, así como de la limpieza periódica de las calderas y que poseen un contenido importante de productos orgánicos tóxicos y una demanda de oxígeno elevada. Las cantidades generadas de estos productos son, no obstante, relativamente pequeñas, su producción muy localizada y su tratamiento se está realizando satisfactoriamente por métodos biológicos, aerobios y anaerobios y, por ello, su impacto sobre el medio ambiente debe considerarse de muy escaso o nulo alcance.

Los efluentes sólidos están constituidos, de acuerdo a las cenizas recogidas en los propios hornos (habitualmente denominada escoria), en los ciclones y demás sistemas de filtración de gases.

A diferencia de lo que ocurre con las cenizas del carbón que suelen presentar valores elevados de algunos metales pesados, las obtenidas en la combustión de biomasa se consideran que, en general, pueden ser devueltas al suelo como aporte de nutrientes al mismo, por lo que es una posibilidad de ahorro de fertilizantes en los cultivos y superficies forestales en vez de ser un problema real, aunque bajo una estricta reglamentación y control en lo referente a cantidad y composición de la ceniza de acuerdo al tipo de suelo en el que se depositan.

La producción, recolección y transporte de biomasa para su utilización energética determina además algunas emisiones parecidas a las originadas por la industria agrícola. Principalmente el CO y partículas, liberados como consecuencia de la utilización de combustibles fósiles en maquinarias de cosecha y transporte además de las derivadas del empleo de fertilizantes nitrogenados (N_2O) y pesticidas volátiles.

5.2. EL SUELO COMO RECURSO

El suelo es un cuerpo natural que forma parte de la capa superficial de la corteza terrestre de espesor variable. Está integrado por componentes minerales y orgánicos (sólidos), además de agua y aire, configurando un sistema de tres fases: aire, sólidos y agua, y constituye un recurso vital para el desarrollo de las actividades humanas, y como ecosistema integrado de organismos, que interactúan mediante procesos físicos y biológicos que ayudan a mantener los ciclos ecológicos.

Se puede establecer que el suelo es un componente básico de los ecosistemas productivos, sirviendo de soporte para las plantas y árboles, actuando como regulador del intercambio de agua y nutrientes necesarios para el crecimiento de las plantas, lo que determina en gran medida la calidad de un sitio y la productividad de los cultivos que allí se desarrollen, por lo que las características del suelo condicionan en gran medida la vegetación que allí pueda desarrollarse y de esta manera el ecosistema que pueda configurarse en estas condiciones. Una de las principales funciones del suelo es la liberación de nutrientes a los ecosistemas agrícola o forestal, que determinan, entre otras cosas, la tasa de fotosíntesis y la producción de biomasa.

Existen tres ciclos importantes en la generación de la biomasa, en los cuales el suelo juega un rol preponderante:

- Ciclo geoquímico, que incluye entradas de la atmósfera y el suelo, y las pérdidas por cosecha, lavado y erosión.
- Ciclo biogeoquímico, que incluye la absorción de nutrientes desde el suelo, y su retorno por la hojarasca y la biomasa en descomposición.
- Ciclo interno, que es la conservación y movimiento interno de los nutrientes al interior de las plantas.

5.2.1. Principales efectos ambientales sobre el suelo

En el caso de las cosechas agrícolas o forestales, el suelo y los procesos para los cuales este elemento sirve de soporte, pueden verse afectados de diversas formas, siendo algunas de las principales el aumento de la insolación, cambios en la temperatura del suelo y alteraciones a la disponibilidad de agua, alterando de manera significativa cada uno de los procesos químicos involucrados en el balance nutricional del ecosistema vegetal que se desarrolla (bosque, cultivo o plantación).

Otro de los efectos significativos es el quiebre del balance de elementos nutritivos, producto del agotamiento por el consumo por parte de los especies vegetales de elementos nutritivos, sin que se desarrollen mecanismos de reposición que garanticen su reposición en el suelo. Esta situación se acentúa al utilizar sistemas de cosecha que extraen completamente la biomasa generada en el bosque o en el cultivo agrícola, por lo que elementos nutritivos que pueden estar presentes en esta biomasa residual no son devueltos al suelo.

En el caso de las plantaciones forestales al tratarse generalmente de especies de rápido crecimiento y con ciclos cortos de rotación, claramente el reemplazo de los nutrientes perdidos no puede ser compensado mediante mecanismos naturales de reposición, por lo que el mantenimiento de un suministro constante de estos elementos de manera artificial se hace evidentemente necesario.

La sustitución del suelo para el establecimiento de plantaciones con fines energéticos es uno de los problemas que recurrentemente se está investigando, ya que la instalación de proyectos de generación de energía a partir de biomasa supone necesariamente la disponibilidad de grandes extensiones del territorio que aseguren un abastecimiento continuo del proceso. Esto genera un incentivo a la sustitución de praderas naturales o cultivos extensivos de bajo rendimiento, y su transformación en tierras arables para el cultivo de plantaciones energéticas. Existen impactos sobre el suelo que deben ser cuantificados para generar una estimación del potencial real de utilización de biomasa como combustible, siendo de especial preocupación los efectos erosivos y sobre la disponibilidad de agua, sobre todo en países mediterráneos donde las lluvias se concentran en épocas bien definidas del año.

El uso extensivo de la biomasa puede generar una presión y sobreexplotación de los nutrientes de los suelos, y en el caso de aprovechamiento de residuos generar una tendencia contraria a la que se busca actualmente, tendente a disminuir la cantidad total de residuos generados por unidad productiva. En el caso de los bosques puede favorecer también la extracción de biomasa residual que antes permanecía en el sitio y permitía la entrega gradual de nutrientes al suelo, por lo que el aprovechamiento de esta biomasa residual debe ser compatible con las características del suelo y adaptarse a situaciones específicas para lograr un adecuado manejo.

En los países desarrollados esta situación puede ser aún más frágil, ya que el suelo es un bien relativamente escaso, y por lo tanto un uso extensivo podría generar además otros problemas económicos y sociales que deben ser considerados.

Una cuantificación de la superficie teórica disponible para el establecimiento de programas de utilización de biomasa como fuente energética en la Comunidad Europea, asumiendo restricciones ambientales planteadas sobre la base de los problemas descritos, determina que es posible incrementar la producción de energía a partir de biomasa hasta un total de 190 Mtoe en el año 2010 y 295 Mtoe en 2030.

La calidad del sitio puede ser cuantificada mediante métodos directos e indirectos, ya sea por la determinación de un volumen y altura promedio por unidad de superficie, como por la medición de factores del medio que se consideren íntimamente relacionados con el crecimiento de los árboles y plantas.

En el caso de los bosques, la cuantificación de la productividad está directamente ligada con el volumen de madera alcanzado por unidad de tiempo y en una superficie dada. En muchos casos se considera el Índice de Sitio (IS), como un indicador de la pro-

ductividad que posee una zona. Este expresa el crecimiento promedio, en términos de la altura dominante, que experimentan los árboles de una zona determinada, a una edad clave constante que permita comparar distintas situaciones.

Los efectos en las propiedades físicas del suelo se refieren principalmente a las alteraciones directas sobre la fracción mineral del suelo, provocando una pérdida material desde la superficie, ya sea por fenómenos naturales propios del entorno, o bien por la ejecución de labores productivas. En general los principales impactos que se generan son los siguientes:

- Alteración de la estabilidad del suelo.
- Erosión hídrica y producción de sedimentos.
- Compactación del suelo.
- Remoción o desplazamiento del suelo.

Los efectos en el ciclo de nutrientes y la fertilidad del suelo representan aquellos impactos que muchas veces no son visibles, debido a que se producen en el balance de nutrientes propio del suelo y por tanto no genera un efecto físico apreciable superficialmente. Los efectos sobre el ciclo de nutrientes, compuesto por tres etapas o ciclos (ciclo geoquímico, ciclo biogeoquímico y ciclo interno) pueden afectar de diversas formas, principalmente por el aumento de la insolación, de la temperatura y de la disponibilidad de agua en el suelo, además que se puede producir un quiebre en el balance de elementos nutritivos, producto del agotamiento por el consumo por parte de los árboles o plantas de los principales elementos nutritivos, sin que se desarrollen mecanismos de reposición que garanticen su reposición en el suelo.

La situación anterior se acentúa al utilizar sistemas de cosecha que extraen una parte considerable de la biomasa desde el cultivo, sobre todo cuando se extraen ramas, hojas y flores, ya que son las estructuras que concentran gran parte de los nutrientes de una planta.

5.2.2. Cultivos energéticos y efectos sobre el suelo

Al analizar lo descrito anteriormente, se colige que claramente existe un efecto negativo de plantaciones intensivas en producción de biomasa (todo ello también debe hacerse extensivo a las plantaciones de plantas para obtención de alcoholes y biodiesels), como las necesarias para el desarrollo de una industria de aprovechamiento de la biomasa como fuente energética.

En el caso de plantaciones bioenergéticas, al tratarse generalmente de especies de rápido crecimiento, y con ciclos cortos de rotación, provoca que el reemplazo de los nutrientes perdidos y las demandas de estas plantas no puedan ser compensados mediante mecanismos naturales de reposición. Por lo que para mantener un suministro constante de estos elementos, se hace necesaria una entrada artificial de estos, con lo cual es posible resolver parte importante del problema.

Pero si esto se compara a las actuales condiciones de los cultivos agrícolas o forestales, este efecto posee algunas aristas que es necesario comparar. En primer lugar si los cultivos se desarrollan sobre suelos que anteriormente estaban descubiertos y/o carentes de vegetación, cualquier impacto que se produce es menor al que naturalmente se genera en ese sistema, ya que los fenómenos erosivos y de nutrición del suelo, son claramente menores, ya que se incorporan importantes sistemas radiculares en los primeros centímetros de la superficie, aumentando la protección sobre un suelo que anteriormente estuvo descubierto. Este fenómeno es especialmente favorable en el caso de plantaciones o cultivos perennes, a los cuales corresponden muchas de las especies utilizadas como fuentes de biomasa con fines energéticos.

Cuando se plantea, por ejemplo, el aprovechamiento de los residuos de una plantación forestal o de un cultivo agrícola, se generan también beneficios, ya que disminuye considerablemente los riesgos de incendio y la necesidad de quemar artificialmente los residuos, fenómenos que destruyen por completo los ciclos de nutrientes naturales del suelo.

Un manejo integral de los cultivos energéticos deberá incorporar entonces las variables ambientales desde un inicio, tomando por ejemplo, medidas para una elección adecuada de las especies, preferentemente perennes, la incorporación de los residuos de los cultivos en el suelo, la rotación de cultivos, la utilización de suelos pobres o erosionados y la adecuada ejecución de labores de cosecha y producción. Con lo cual, los esperados efectos negativos sobre el suelo son mitigados de manera considerable, generándose incluso beneficios atribuibles al desarrollo de una industria de los biocombustibles. En este sentido especialmente la industria forestal ha reconocido al suelo como parte importante de su ciclo productivo y por lo tanto ha creado una serie de normas y re-

glamentaciones, agrupadas en las denominadas mejores prácticas forestales, que incluyen no sólo prohibiciones y restricciones al uso de ciertas técnicas, sino que además suministran pautas claras de prácticas y actividades que mitigan y controlan los efectos ambientales sobre el suelo, mejorando su productividad y la sostenibilidad de los cultivos en el tiempo.

Es importante finalizar este apartado teniendo en cuenta que pueden existir otras consideraciones ambientales, como por ejemplo la presión sobre la superficie cultivable disponible y la competencia con los recursos alimenticios, que deben ser considerados para el diseño de las políticas de promoción de las energías alternativas, pero considerando que es imposible atribuir *a priori* impactos ambientales mayores a los cultivos energéticos, cuando los sistemas naturales que los sostienen son los mismos que durante décadas han permitido el mantenimiento de una industria agroalimenticia y de recursos madereros altamente tecnificada y que usa de manera intensiva grandes extensiones de la superficie terrestre, sin olvidar, además, los beneficios sobre el ciclo del CO_2 que el desarrollo de esta industria supone a los problemas ambientales globales.

5.3. BALANCE ENERGÉTICO

Uno de los aspectos relevantes que deben ser considerados al plantear el desarrollo de programas de aprovechamiento extensivo de la biomasa como fuente de energía es el balance energético que estos sistemas poseen, ya que su utilización a gran escala supone la necesidad de suministro de una serie de materias primas, bienes y servicios que consumen energía antes y durante el ciclo productivo de los cultivos que originan la biomasa que será utilizada.

El concepto clave en este sentido es el cálculo de las unidades de energía utilizadas por unidad de energía potencial contenida en el biocombustible. En este sentido la utilización de cultivos energéticos de especies leñosas, para la generación de calor y electricidad, alcanzan una relación de entre 10:1 y 20:1, es decir generan 10 o 20 veces más energía de la necesaria para su cultivo y procesamiento, por lo que el balance energético es favorable y su utilización permite un eficiencia en el uso de los recursos naturales, los residuos de una industria maderera alcanzarían incluso relaciones de 30:1, ya que se favorece de otros procesos y solo una fracción de la energía es atribuida de manera específica al residuo.

El caso del biodiésel y los bioalcoholes presenta un rendimiento bastante diferente ya que la obtención de biodiésel a partir de cultivos de semillas oleoginosas alcanza un ratio de 3:1 y la obtención de etanol a partir de cereales sólo sobrepasa levemente un ratio de 1:1. Diversos autores plantean incluso que la relación es negativa y la energía necesaria para obtener una unidad de bioetanol es varias veces superior a la energía que puede ser luego obtenida en la combustión de este biocarburante. Estudios recientes desarrollados por la Universidad de Berkeley, en EE UU, desmienten estas afirmaciones a través de un modelo que integra todas la variables de la producción de etanol a partir del cultivo de maíz, y que concluye que la producción de bioetanol se consigue con menores consumos de energía, y por lo tanto su ratio es superior a 1 convirtiendo esta alternativa en un sistema eficiente en el aprovechamiento de recursos energéticos.

A pesar de lo anterior, al plantear la utilización de biomasa como combustible, sobre todo cuando se trata de cultivos con fines energéticos, se requiere de un detallado análisis del flujo de energía y los insumos necesarios para la transformación.

5.4. OTROS EFECTOS AMBIENTALES

La utilización de biomasa genera además otros efectos sobre el medio ambiente que es necesario analizar. En primer lugar, el uso extensivo de cultivos con fines energéticos favorece la sustitución de ecosistemas naturales y por lo tanto la biodiversidad de otras especies puede verse amenazada. Esta situación se aprecia con mayor intensidad debido al establecimiento de cultivos monoespecíficos de corta rotación. De igual manera la extracción de residuos de biomasa abandonada en el bosque puede afectar a otras especies adaptadas a estos sistemas y que se benefician de esta materia orgánica para su desarrollo.

Hay además una serie de situaciones asociadas claramente a la construcción y operación de instalaciones industriales para la valorización de la biomasa que, en términos generales, se pueden resumir de la siguiente manera:

Etapa de construcción

- Pérdida de suelo por la instalación.
- Efectos sobre el paisaje por la construcción de obras y servicios como caminos y tendidos eléctricos.
- Ruido y polvo asociado a las obras de construcción.

Etapa de operación

- Emisiones de CO, gases y partículas por la combustión de la biomasa.
- Aumento del flujo de camiones por transporte de materias primas y emisiones asociadas a la combustión de sus motores y polvo al transitar por caminos no pavimentados.
- Alteración de la calidad del suelo por la utilización de residuos agrícolas y forestales que pueden causar una disminución en la cantidad de nutrientes aportados al medio.
- Impacto visual sobre poblaciones vecinas, tanto por las instalaciones industriales como por la necesidad de levantar tendidos eléctricos en la zona.
- Generación de cenizas, escorias y residuos de los sistemas de filtración y depuración de los gases de la combustión.
- Impacto visual de los tendidos eléctricos para la conexión a la red de distribución y la electrocutación de aves en las líneas de alta tensión.

5.5. CONSIDERACIONES AMBIENTALES GENERALES

Los impactos descritos anteriormente no difieren a los que puede presentar cualquier proyecto desarrollo industrial y por lo tanto no son exclusivos al aprovechamiento de los recursos de biomasa.

Existen también beneficios ambientales que es necesario cuantificar, ya que la utilización de biomasa como fuente de energía, a través del aprovechamiento de residuos y un manejo integral de los recursos naturales, genera situaciones que favorecen los sistemas naturales, ya que disminuyen los riesgos de plagas e incendios forestales, permite la valorización grandes extensiones de territorio abandonadas o que han sufrido deterioro por acción de agentes erosivos, genera beneficios sociales al mejorar las condiciones de zonas rurales y fomenta la protección de sitios degradados a través del establecimiento de plantaciones.

Las estrategias para un uso sustentable de la biomasa como fuente energética debe considerar entonces tanto los beneficios ambientales que aporta a los sistemas naturales como también un control de los impactos, a través de los siguientes aspectos que permiten evitar la presión sobre el medio ambiente:

- Definir claramente zonas de protección y uso de extensiones importantes del territorio para el desarrollo de agricultura de bajo impacto ambiental, como, por ejemplo, los cultivos orgánicos.
- Favorecer el establecimiento de plantaciones energéticas de bajo impacto ambiental, fomentando las especies perennes y que presenten mayor productividad por unidad de territorio utilizada.
- Fomentar la utilización de especies adaptadas a condiciones ambientales en los cuales se establecen los cultivos energéticos, por ejemplo utilizando especies de bajo consumo de agua que no requieran sistemas de regadío.
- Establecer rotaciones mixtas de especies, que disminuyan los riesgos de enfermedades o plagas y fomenten la creación de ecosistemas con una estructura análoga a los sistemas naturales, por ejemplo a través de la integración de especies arbustivas perennes y especies forestales de rápido crecimiento.
- Un análisis del ciclo de vida de los proyectos es fundamental, incluyendo un detalle del balance energético esperado y que justifique los esfuerzos llevados a cabo para desarrollar la industria del aprovechamiento de los residuos agrícolas y forestales.

Es necesario constatar las ventajas asociadas, ya que el solo hecho de postular un nuevo uso a la biomasa de origen residual, permite disminuir la cantidad de residuos que en la actualidad no poseen una finalidad y generalmente terminan en vertederos donde ocupan grandes extensiones de terreno, además de generar impactos ambientales significativos durante este ciclo.

Las técnicas propuestas han permitido constatar la posibilidad de utilizar dicha biomasa residual para una variedad de fines, en los que además de dar un uso a estos residuos, permite obtener beneficios adicionales que son claramente cuantificables en el caso de la generación de energía. La generación de energía permite solucionar un problema frecuente en la actualidad que se relaciona con la disponibilidad de recursos energéticos, y la utilización de combustibles fósiles, tal como se comentó en el inicio de este capítulo.

Finalmente es necesario enfatizar que el empleo de biomasa como fuente energética evita la producción de grandes cantidades de CO_2 al sustituir la utilización de combustibles fósiles, reservorios confinados de carbono que se encontraban fuera del ciclo natural durante millones de años, cuya liberaliza-

ción ha provocado un aumento sostenido en la concentración de CO_2 en la atmósfera.

A efecto de la emisión de CO_2, las directivas de la UE citan, de manera expresa, la lista de biomasas que se consideran neutras respecto al CO_2:

- Plantas y partes de las mismas: Paja, heno, hierba, madera, cultivos, etc.
- Residuos, productos y subproductos de la biomasa: madera residual industrial, subproductos de operaciones de tratamiento de madera, residuos a base de madera de las industrias de fabricación de papel y pasta de papel (por ejemplo, licor negro), desechos de selvicultura, harinas de animales, pescado, grasa, aceite y sebo. Desperdicios de la fabricación de alimentos y bebidas. Estiércol. Desperdicios de plantas agrícolas. Fangos de depuradoras. Biogás procedente de procesos de fermentación anaerobia, gas de vertedero, etc.
- Fracción de biomasa de desperdicios mezclados procedente de fabricación de alimentos y bebidas, fracción de biomasa de compuestos que contienen madera, papel, textiles. Fracción de biomasa de los RSU y residuos industriales, ya sean tratados o no.
- Combustibles cuyos componentes y productos intermedios han sido obtenidos a partir de biomasa: biocombustibles, biocarburantes, productos de pirólisis, gasificación, etc.

6. Funcionamiento esperado en una instalación de valorización de residuos forestales

En el presente apartado se presentan los resultados de una modelización esperada de una instalación de valorización energética de residuos provenientes de la industria forestal, considerando para ello los parámetros de disponibilidad discutidos y la incineración como proceso de aprovechamiento energético de la biomasa residual.

Se considera el abastecimiento de materias primas provenientes en mayor proporción de desechos de la industria procesadora de madera y restos de podas y cosechas de plantaciones forestales. Se considerará como parte de este proyecto el transporte de las materias primas necesarias considerando una continuidad y seguridad en el flujo necesario para mantener el normal funcionamiento de la instalación.

La Tabla 10.25 muestra las principales características de los biocombustibles que serán considerados en esta instalación.

Tabla 10.25. Características principales de los biocombustibles utilizados

Biocombustible	% Humedad promedio*	PCI útil (kcal/kg)	Procedencia
Ramas, corteza y madera de *Pinus sp.*	50	2.500	Restos de podas, raleos y cosecha de plantaciones forestales
Aserrín	45	3.000	Barracas y aserraderos Etapas de aserrado y reproceso

* Humedad promedio respecto del peso seco del biocombustible.

Respecto de los requerimientos en términos de cantidad de los biocombustibles utilizados, se debe estimar a partir de las necesidades energéticas del horno de combustión y la caldera instalada, y según la eficiencia y el PCI, permite determinar la cantidad de biomasa necesaria para suplir la demanda energética que permita el funcionamiento de la turbina en condiciones normales.

Se plantea la evaluación de una turbina de 5 MW de potencia eléctrica instalada. Se puede establecer que, en términos generales, los rendimientos en este tipo de proyectos son de un 20% de la energía contenida en el biocombustible. Con estos datos es posible realizar una cuantificación de la biomasa necesaria para alimentar los hornos y también determinar las características de la caldera asociada y el flujo de agua necesaria.

Con el rendimiento estimado, los 5 MW de potencia eléctrica representan un total de 25 MW necesarios para aprovisionar la energía necesaria al horno, con tal de obtener el 20% de rendimiento eléctrico esperado disponible para ser distribuido al final del proceso. Asumiendo los PCI que se estimaron en la Tabla 10.4, se puede determinar lo siguiente:

Si el PCI útil, a partir de un 50% humedad, es 2.800 kcal/kg (1 kW = 860 kcal/h). Entonces:

$$\frac{2.800}{860} = 3{,}3 \text{ kW/kg}$$

es la energía aportada por kilogramo de biomasa.

Luego sabiendo que es necesario aportar energía equivalente a 25.000 kW por hora de funcionamiento a la central, es posible determinar el requerimiento de materia prima necesario para la instalación. De esta forma se obtiene lo siguiente:

$$\frac{25.000 \text{ kW/h}}{3,3 \text{ kW/kg}} = 7.560 \text{ kg/h}$$

Es decir alrededor de 7,5 toneladas de biomasa por hora de funcionamiento, si se abastece únicamente la instalación con residuos de la cosecha forestal.

Considerando que es posible hacer una combinación de biocombustibles, utilizando una proporción de un 20% del total necesario de la industria secundaria de la madera, es decir de aserraderos y plantas procesadoras de madera, se puede aumentar la eficiencia del sistema y disminuir la biomasa necesaria. Las estimaciones para esta situación serían las siguientes:

Si el aserrín posee un PCI de 3.000 kcal/kg:

$$\frac{3.000 \text{ kcal/kg}}{860 \text{ kcal/kW}} = 3,5 \text{ kW/kg}$$

es la energía aportada por kilogramo de biomasa.

Sabiendo que es necesario aportar energía equivalente al 20% de las 25.000 kW, es decir 5.000 kW por hora de funcionamiento a la central, es posible determinar el requerimiento de materia prima necesario para la instalación. De esta forma se obtiene lo siguiente:

$$\frac{5.000 \text{ kW/h}}{3,5 \text{ kW/kg}} = 1.429 \text{ kg/h}$$

es decir alrededor de 1,4 toneladas de biomasa por hora de funcionamiento.

A esto se debe sumar el requerimiento del 80% restante de biomasa de pino proveniente de las faenas forestales, que se estima de manera similar donde:

PCI útil de la madera de pino con un 40% humedad es 2.500 kcal/kg;

$$\frac{2.500 \text{ kcal/kg}}{860 \text{ kcal/kW}} = 3,3 \text{ kW/kg}$$

es la energía aportada por kilogramo de biomasa.

Luego sabiendo que es necesario aportar energía equivalente a 20.000 kW por hora de funcionamiento a la central, es posible determinar el requerimiento de materia prima necesario para la instalación. De esta forma se obtiene lo siguiente:

$$\frac{20.000 \text{ kW/h}}{3,3 \text{ kW/kg}} = 6.060,6 \text{ kg/h}$$

es decir, alrededor de 6 toneladas de biomasa por hora de funcionamiento.

En resumen se puede establecer una tabla donde se presentan las estimaciones de necesidades de materia prima para diversos escenarios de disponibilidad de biomasa para la combustión. Siguiendo el mismo procedimiento anterior se determinaron los valores mostrados en la Tabla 10.26, para distintas proporciones de utilización de los dos biocombustibles.

Si se estima que la instalación funcionará un total de 335 días al año, es decir alrededor de 8.040 horas, es posible determinar los requerimientos totales de biocombustibles y la generación esperada de electricidad para el periodo, asumiendo para ello que el abastecimiento será de 80% de pino y 20% de aserrín.

Tabla 10.27. Requerimientos totales de biocombustibles y generación de electricidad esperada

Biocombustibles	Requerimiento aproximado	Procedencia	Producción de electricidad
Pino	51.858 t/año	Restos de cosechas, cortas intermedias y podas de bosques de aledaños	40.200 MWh/año
Aserrín seco	12.100 t/año	Aserraderos e industrias forestales	

Tabla 10.26. Necesidades aproximadas de biocombustibles para la instalación en estudio

Biocombustibles	% Humedad	Proporción de utilización de los biocombustibles			
		100% pino	80% pino 20% aserrín	60% pino 40% aserrín	40% pino 60% aserrín
Residuos de pino radiata (t/h)	50	9	6,5	4,8	3,2
Aserrín y virutas (t/h)	45	0	1,5	3,0	4,5

* Se estimó un 5% adicional de biocombustible necesario para asegurar el normal abastecimiento.

6.1. PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO Y DISEÑO DE UNA INSTALACIÓN

A partir de la descripción típica de una instalación industrial para la valorización energética de la biomasa, como la descrita en el apartado 3 de este capítulo, y las características propias de los biocombustibles utilizados en este ejemplo, es posible estimar los parámetros de funcionamiento de la instalación, el flujo de materias de cada proceso y los requerimientos de materiales. La composición elemental de la biomasa es aproximadamente la presentada en la Tabla 10.28.

Tabla 10.28. Composición elemental de los biocombustibles

Biocombustible	%C	%H	%O	%S	%N	%Cl	% Cenizas
Residuos Pino	51,0%	6,3%	41,4%	0,1%	0,1%	0,2%	1,0%
Aserrín	51,0%	6,3%	41,4%	0,1%	0,1%	0,2%	1,0%

A partir de esta información es posible determinar los porcentajes totales de material combustible, la cantidad de cenizas y el agua contenida en los biocombustibles utilizados por cada hora de funcionamiento.

Tabla 10.29. Análisis racional de la mezcla de biocombustibles

Componente	Cantidad (kg/h)	% Respecto del total
Combustible	5.728	66,6%
Cenizas	58	0,7%
Agua	2.820	32,7%
Total	**8.623**	**100,0%**

Con estos datos es posible determinar que anualmente se producirán un total de 465 toneladas de cenizas y/o escorias en la caldera, que deberán ser extraídas y tratadas. A partir de la fracción combustible y su composición elemental de los combustibles se puede calcular la cantidad de oxígeno necesario para el proceso de combustión, y estimar el flujo de gases de combustión.

La Tabla 10.30 muestra los cálculos con una relación del 50% de exceso de aire sobre el valor estequiométrico.

Tabla 10.30. Cálculo de masa de aire necesario

Necesidad de O_2/aire	Peso (kg/h)
O_2 para oxidar C	7.861
O_2 para oxidar H_2	2.913
O_2 para oxidar S	6
O_2 para oxidar Cl (como HCl)	9
O_2 para oxidar N (como NO_2)	10
Total O_2 estequiométrico	10.800
O_2 en combustible	2.393
Total O_2 exterior (aire)	8.407
Aire estequiométrico	36.550
Exceso de aire	1,5
Aire necesario	54.826

La Tabla 10.31 muestra un análisis de los gases (gases húmedos) de combustión.

Tabla 10.31. Cálculo de masa de gases de combustión

Componente de los gases de combustión	Peso (kg/h)
N_2 en gases	42.216
O_2 en los gases	4.203
CO_2	10.809
H_2O	3.277
SO_2	12
HCl	8
NO_2	38
Gases de combustión (parcial)	60.563
Cantidad de agua de humedad	2.820
Total gases combustión	63.383

6.1.1. Balance de materia del sistema

La Tabla 10.32 muestra el balance de masas del proyecto.

Tabla 10.32. Balance de masa de la instalación

	Entrada kg/h	Salida kg/h
Combustible	8.623	
Aire	54.826	
Gases de combustión		63.383
Cenizas		58
Total	63.449	63.441

De la tabla precedente vale la pena destacar que:

- Para incinerar 8.623 kg/h de combustible (13,5%) se genera una masa de gases a tratar de 63.441 kg/h.
- La cantidad de cenizas es pequeña.

6.1.2. Estimación de la cantidad de contaminantes

Estimando la temperatura del horno, es posible determinar el flujo de gases que se produciría.

Tabla 10.33. Caudal de gases producido

Temperatura horno	950 °C
Densidad	0,26786 kg/m^3
Caudal gases	236.622 m^3/h

De esta forma el caudal de gases en la chimenea y los contaminantes generados por este proyecto se reflejan en la Tabla 10.34.

Tabla 10.34. Volumen de gases en la chimenea

Masa de gases	63.383	kg/h
Temperatura de referencia	20	°C
Densidad	1,2047	kg/m^3
Volumen de gases	52.611	m^3/h

A partir del caudal de gases, a condiciones normales, la Tabla 10.35, calcula los contaminantes, en términos de masa (mg/Nm^3/h) o en volumen.

Tabla 10.35. Volumen de contaminantes

Contaminante	kg/h	mg/Nm^3	% Volumen	ppm (Vol)
Masa de SO_2	11,6	220	0,01%	81
Masa de NO_2	38,0	722	0,04%	371
Masa de HCl	8,5	161	0,01%	106

Estos datos permiten estimar las necesidades de abatimiento de emisiones, que deben ser necesarias para cumplir la legislación vigente en el lugar de emplazamiento de la planta de generación de electricidad, encontrándose valores en los promedios presentados en el apartado 5 que son fácilmente controlables con las actuales técnicas de depuración de gases y son similares a las que puede presentar cualquier otra instalación, considerando además los beneficios ambientales descritos para los sistemas de aprovechamiento energético de la biomasa, sobre todo el aporte esperado de estos proyectos en la disminución de emisión de gases de efecto invernadero y la sustitución de los combustibles fósiles tradicionales, situaciones que deben ser cuantificadas para impulsar con mayor fuerza el desarrollo de este tipo de proyectos sostenibles.

6.2. RESUMEN DE LA GENERACIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES

Por biocombustible se entiende toda aquella materia orgánica de origen no fósil con potencial para producir energía mediante procesos que generen gases o líquidos combustibles. La biomasa se puede valorizar energéticamente para la obtención de electricidad o puede ser utilizada para la elaboración de otros biocombustibles.

El empleo masivo de los biocarburantes no está exento de polémica bajo otros puntos de vista bien diferentes de los ambientales, como pueden ser los éticos ya que muchas voces alertan que la apuesta por los biocombustibles podría provocar hambrunas en los países en vías de desarrollo al derivar gran parte de los cereales y oleaginosas a la fabricación de los biocarburantes. De hecho este efecto perverso ya se ha notado, puesto que el precio de los cereales se ha disparado en las bolsas de contratación. Desde ciertos foros se alienta a la fabricación de biocarburantes a partir de plantas no comestibles, como la jatrofa. Como ejemplo, a primeros de 2007, la gran demanda de maíz en EE UU hizo disparar los precios, de 130 a 180 €/t, de este cereal en Cataluña (en la actualidad el 90% se destina a la elaboración de piensos). En términos de productividad: por cada kilo de maíz se obtienen 0,4 de bioetanol.

Algunos investigadores apuntan a la posibilidad de cultivar en gigantescas piscinas de agua salada un tipo de alga capaz de conseguir un rendimiento por hectárea muy superior, centenares de veces, al girasol, colza o soja. En este sentido toma pleno sentido el desarrollo de variedades transgénicas. Casi cada día sale a luz pública la obtención de una nueva variedad transgénica. A primeros de 2007, la Universidad de Gainesville (Florida, EE UU) obtuvo un tomate que contiene 25 veces la cantidad de ácido fólico de un tomate normal. Así el consumo de un solo tomate al día es suficiente para la aportación de folatos vía alimentos.

La Figura 10.15 muestra de manera simplificada y a título de resumen las vías de obtención de los diferentes biocarburantes a partir de los tipos de biomasa

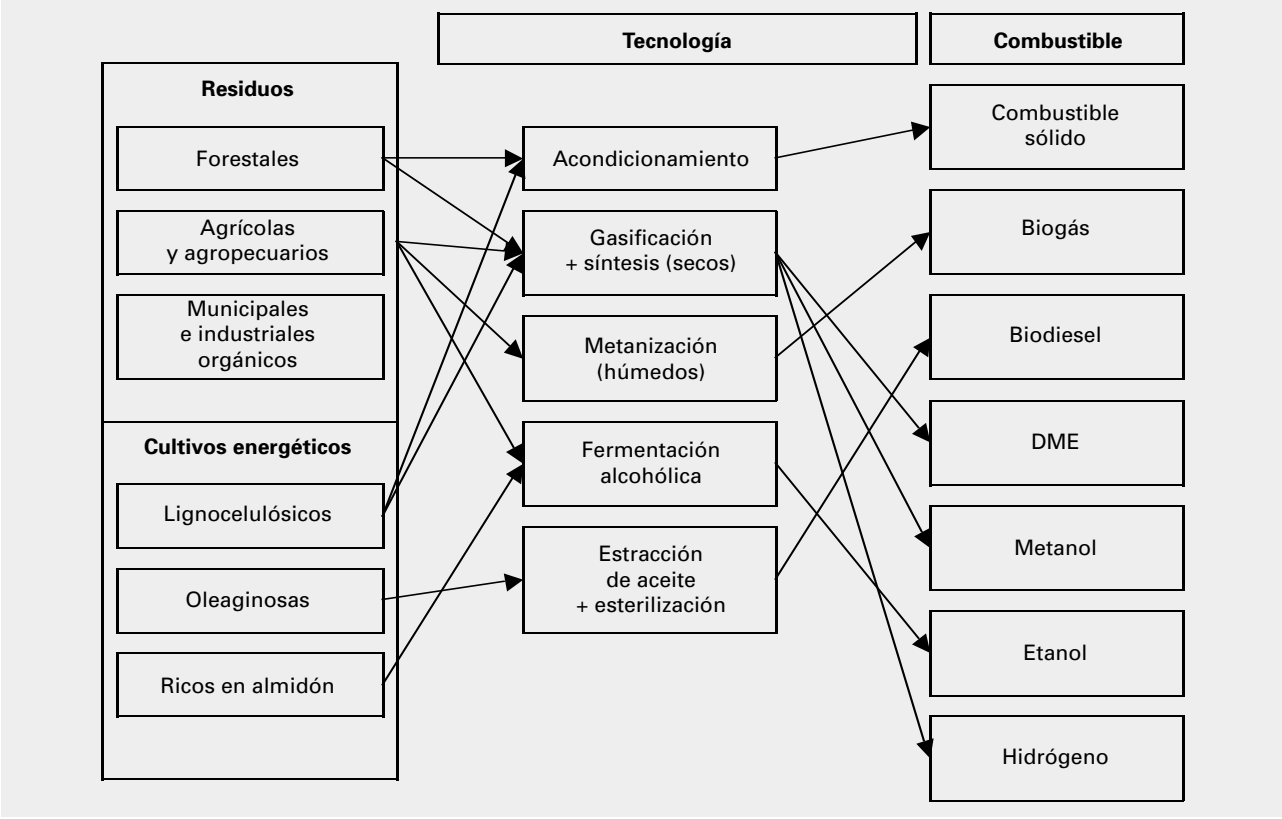


Figura 10.15. Vías de obtención de biocarburantes.

específica y a continuación se hace un pequeño repaso a los biocombustibles con mayores perspectivas.

6.2.1. Resumen práctico para el conocimiento de los biocarburantes

Los dos grandes biocarburantes existentes están basados en compuestos químicos diferentes: alcoholes y ésteres. Por tanto el destino va a ser diferente: alcoholes para motores de ciclo Otto y ésteres para motores diésel. Seguidamente se realiza una pequeña «guía» para ellos:

- *Qué coches, técnicamente, pueden usar bioetanol.* Todos los de gasolina pueden admitir hasta un 10% de biometanol (E10). Para usar mayor cantidad, el E85 que está compuesto del 85% de bioetanol, hay que emplear los vehículos *flexibles* (*flexible fuel vehicle*). En España hay modelos de Ford y General Motors preparados para ello. Lamentablemente, en España no se comercializa el bioetanol (al haber cada día mas coches de gasóleo, hay excedente de gasolina en las refinerías y las petroleras ponen dificultades a la distribución del bioetanol). Sin embargo, las gasolinas convencionales contienen etanol a través del aditivo ETBE.
- *Qué coches, técnicamente, pueden usar biodiésel.* Todos los vehículos de gasóleo fabricados en los últimos diez años pueden funcionar con el 100% de biodiésel. De momento, en las gasolineras hay mezclas del 10% o 20% de biodiésel con gasóleo (B10 o B20) y alguna de B100.
- *Aspectos económicos de los biocarburantes.* En la actualidad en España, los biocarburantes están exentos de los impuestos de hidrocarburos, lo que permite un precio de venta igual al procedente de los combustibles fósiles. Se espera que fabricados en grandes cantidades, los precios se equiparán.
- *Qué cantidad produce España.* Hasta 2006, España no era un gran productor de biocarburantes. Según datos de la APPA, España produce 71.000 t/año de biodiésel, de los cuales exporta el 61% y 238.000 t/año de bioetanol de las que exporta el 26%. Curiosamente, se exporta y no se cumple con los objetivos de la Directiva europea que obliga a unos mínimos de consumo.

6.2.2. Aspectos económicos en la fabricación de biocarburantes

Por lo que hace referencia a las materias primas precisas para fabricar biodiésel a partir de semillas vegetales de soja, colza y palma, en una cantidad de 200.000 t/año de biodiésel y 23.000 t/año de glicerina, los consumos previstos de materias primas son:

- Aceite vegetal: 210.000 t/año.
- Metanol: 20.000 t/año.
- Metilato sódico: 3.350 t/año.
- Hidróxido de sodio: 1.300 t/año.
- Ácido clorhídrico: 1.900 t/año.
- Ácido fosfórico: 672 t/año.
- Ácido cítrico: 150 t/año.
- Otros: 40 t/año.
- Nitrógeno: 210 Nm^3/año.

El consumo eléctrico puede estimarse en 1 kwh/t de biodiésel y se precisa energía térmica para producir vapor y agua para refrigeración.

Por lo que hace referencia a los residuos del proceso, el más importante es la glicerina. Esta es una mezcla de alcoholes que sale de la planta con una humedad del 50% y determinadas concentraciones de otros productos. Para transformarla en glicerina de valor para la industria química básica, generalmente a la industria cosmética, se debe concentrar hasta el 99,8% y purificarla (glicerol medicinal). El problema real es que las cantidades que se van a generar son tan elevadas que el coste de adecuación lo hará inviable y se deberá buscar otro medio de valorización que, en buena lógica, no es otro que la valorización energética.

El residuo alcalino se puede valorizar como abono.

6.3. VALORIZACIÓN DE LOS RESIDUOS FORESTALES DE PODA Y TALA

Las nuevas posibilidades de valorización de la biomasa deriva de las acciones impulsadas para volver a usar la biomasa, principalmente la forestal, como se hacía antaño pero con nuevos procedimientos, espoloneados por el Protocolo de Kyoto y siempre teniendo presente la sostenibilidad de la masa forestal. Una de las iniciativas es el Proyecto Europeo *Bio-South*, promovido por la Energía Renovable de Florencia (Región de la Toscana, Italia, y Navarra, España), que pretende demostrar la viabilidad económica de la valorización de la fracción leñosa comúnmente denominada residuo que se abandona en el bosque.

La Tabla 10.36 muestra las principales características de ambas regiones en 2003.

Tabla 10.36. Características forestales de las regiones de la Toscana y Navarra (Fuente modificada del Proyecto BIOSIT)

	Toscana	Navarra	Unidad
Habitantes	3.461.000	570.000	
Superficie	22.977	10.390	km^2
Superficie forestal	862.336	462.664	ha
% De superpie forestal	37,5	44,5	%
Madera anual talada	1.359.868	199.482	m^3
Madera anual exportada	392.860	0	m^3
Madera anual importada	517.850	139.231	m^3
Madera anual elaborada	1.484.858	338.713	m^3
Potencial residuo forestal	580.000	90.000	t/año

Las cantidades de material combustible que se desprenden de la tabla son importantes (obviamente las posibilidades son mayores en regiones, como Cataluña, donde la masa forestal se acerca al 70%) y su sistema de valorización no presenta inconvenientes desde el punto de vista técnico. El problema estriba en su viabilidad económica, en particular en la logística de alimentación a la planta de conversión energética.

La viabilidad económica viene condicionada por los siguientes parámetros:

- Viabilidad inadecuada por la dificultad de acceso de los medios mecanizados para las labores de tala y recogida. Los sistemas manuales, al menos en Europa, son inviables por el elevado coste de la mano de obra.
- Superficie irregular, con pendientes pronunciadas o morfología del territorio poco o nada aceptable para la mecanización.
- Propiedad forestal de pequeño tamaño y/o no agrupado. La excesiva fragmentación del territorio suele hacer inviable el establecimiento de redes de gestión de las labores, de la recogida y de la posterior venta.
- Falta de un mercado apropiado, en particular en las regiones del sur de la UE donde la escasez de calderas y estufas, privadas o públicas, conlleva la imposibilidad de establecer unos precios estables y/o asequibles.
- Dificultades administrativas, tanto por lo que hace referencia a la propia explotación como a los posibles usos en la valorización, sobre todo si se trata de plantas de cierto tamaño.

El resultado de todo ello es el abandono de la biomasa en el bosque, con las pérdidas de oportunidades económicas y ambientales y el peligro de los incendios forestales.

Toda la serie de ensayos derivados del estudio *Bio-South* han demostrado que el rango de viabilidad económica se obtiene para un precio de venta de 40-50 €/t (con una humedad del 25%), en forma de pelets que tienen un diámetro máximo de 12 mm. La Tabla 10. 37, muestra los resultados de estos ensayos.

La tecnología usada en el proyecto consiste en una caldera de biomasa (de hecho dos modelos, para tratar diferentes cantidades), con alimentación continua, en forma de pelets, y con potencias entre 20 y 1.200 kW; regulación independiente y regulada del aire primario y secundario. Uno de los resultados afirma que España podría afrontar el 50% del gasto de calefacción a base de biomasa forestal.

En ciertas partes del planeta, concretamente en el sudeste asiático, se ha comenzado una tala indiscriminada de árboles para plantar cultivos energéticos de rápido crecimiento, como la palma (para producir biocarburantes que se venden en la UE). Es obvio que esta práctica resulta inaceptable ya que no es sostenible y el balance de emisión de CO_2 resulta claramente desfavorable.

Tabla 10.37. Datos finales de los ensayos preliminares (Fuente Proyecto BIOSIT)

	Distancia	Cantidad	Coste	Coste	Materia	Vehículo
Ensayo	**km/viaje**	**t**	**€/MWh**	**€/MWh/km**		
1	5,00	2,70	13,12	2,62	Pelet	Tractor + remolque
2	1,00	6,00	2,42	2,42	Pelet	Tractor + remolque
3	0,25	13,0	0,75	3,00	Pelet	Contenedor

7. La sostenibilidad

Es difícil aplicar un término como sostenibilidad a un sistema tan complejo como el de la utilización de la biomasa, ya que depende de muchísimos factores, muchos de ellos relacionados entre sí.

La Tabla 10.38 da una idea del consumo de energía primaria en la UE (25 países) según fuente de cada país. De este consumo de energía primaria en Europa, 882.301 ktep fueron producidas en la UE y 907.216 ktep fueron importadas, siendo la diferencia con respecto al consumo la parte correspondiente a exportación. Lo más preocupante es, sin embargo, la tendencia a la baja de la producción europea y al alza la importación, que tuvo un incremento del 4% interanual en el período 2003-2004. Esta dependencia energética del exterior es otro de los factores que impulsan a las administraciones públicas a incentivar los sistemas de producción energética a partir de fuentes propias.

De acuerdo con la tabla, las energías renovables superan ligeramente el 6% del total, jugando la biomasa un papel muy secundario, de 69.000 ktep; es decir, un 3,9%.

Según un estudio de la EEA (Agencia Europea de Medio Ambiente) que evalúa la cantidad de biomasa para obtención de energía renovable que se puede extraer sosteniblemente de Europa se cifra y estima el consumo y potencial de energía primaria en forma de biomasa:

Tabla 10.38. Consumo de energía primaria en la UE (25) (en ktep)

Consumo total	1.746.880 (ktep)
Combustibles sólidos	311.954
Crudo y productos petróleo	650.563
Gas natural	417.581
Energía nuclear	254.361
Renovables	109.194

- Uso de biomasa en 2003: 69 Mtep
- Potencial en 2010: 190 Mtep
- Potencial en 2030: 295 Mtep

El uso de biomasa para alcanzar el objetivo europeo de energía renovable en 2010 sería de 150 Mtep, para lo que hay capacidad pero que resulta inalcanzable si se mantiene el actual ritmo de crecimiento. El uso del potencial de biomasa en 2030 supondría evitar emitir entre 400-600 Mt de CO_2.

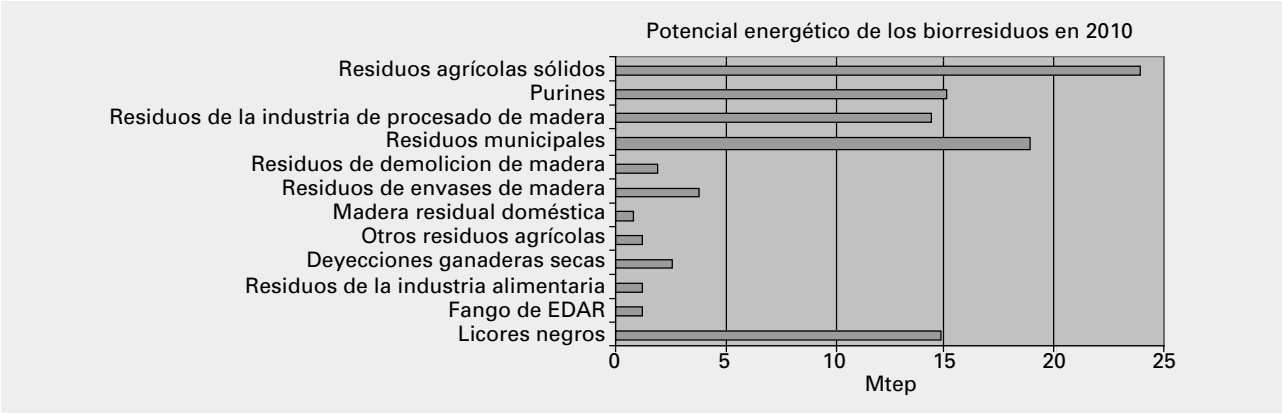


Figura 10.16. Potencial de los bioresiduos.

El potencial de extracción de biomasa de manera ambientalmente sostenible se puede dividir en bioresiduos, cultivos energéticos y masas forestales. Los datos de potencial energético de estos residuos están elaborados por la EEA y reflejan las políticas de la UE y las realidades geográficas de todos los países, aunque no incluye datos de Malta, Grecia, Chipre ni Luxemburgo. La Figura 10.16 muestra el potencial de los denominados bioresiduos.

Las cifras que aparecen en la Figura 10.16 equivalen a 103 Mtep. Es decir, su valorización masiva supondría más de la mitad de las necesidades fijadas para 2010. Este objetivo, si bien hay tecnología ambientalmente segura para alcanzarla, tropezará con la actitud de algunos grupos radicales ecologistas que, incomprensiblemente, hacen una distinción entre «biomasa» (se entiende la forestal, a la que permiten y alientan su valorización energética por medio de la incineración) y los «residuos» (aunque sean también de biomasa, no están dispuestos a aplicarles la misma lógica).

La Figura 10.17 reproduce el potencial valorizable de las masas forestales en 2010, de acuerdo con la estimación de las autoridades ambientales citadas.

La Figura 10.18 muestra el potencial energético agrícola, en Mtep, de la UE-25 para 2010 y 2020. En este sentido, el Libro Blanco de la Energía señala a España como el país de la UE con mayor potencial de recursos de biomasa.

Obsérvese que la UE prevé un aumento del cien por cien en las explotaciones agrícolas de carácter energético.

En este sentido, el Libro Blanco de la Energía señala a España como el país de la UE con mayor potencial de recursos de biomasa. La UE ha dado un impulso al uso de la biomasa al aprobar el Plan de Acción Europeo sobre la Biomasa, en diciembre de 2005 en el seno de la Comisión Europea. La propia Comisión, en 2006, ha aprobado un Plan de Acción de la UE para los Bosques (SEC, 2006, 748). También, para la potenciación de la biomasa, en la UE, existen dos comités:

- Comité CEN/TC 335 *Solid Biofuels* que trata de los biocombustibles sólidos.
- Comité CEN/TC 343 *Solid Recovery Fuels*, el cual trata de los combustibles sólidos recuperados a partir de residuos combustibles no peligrosos.

El Plan de Energías Renovables 2005-2010, elaborado por el Instituto para la Diversificación y el Ahorro de Energía (IDAE), plantea que la biomasa debe aportar el 45% de la energía renovable en Es-

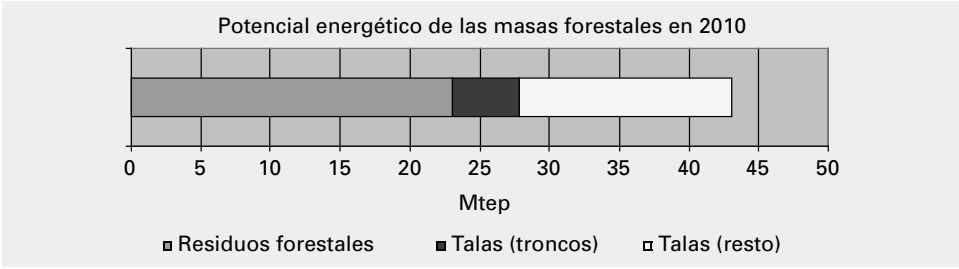


Figura 10.17. Estimación, en Mtep, de los recursos procedentes de las masas forestales en la UE.

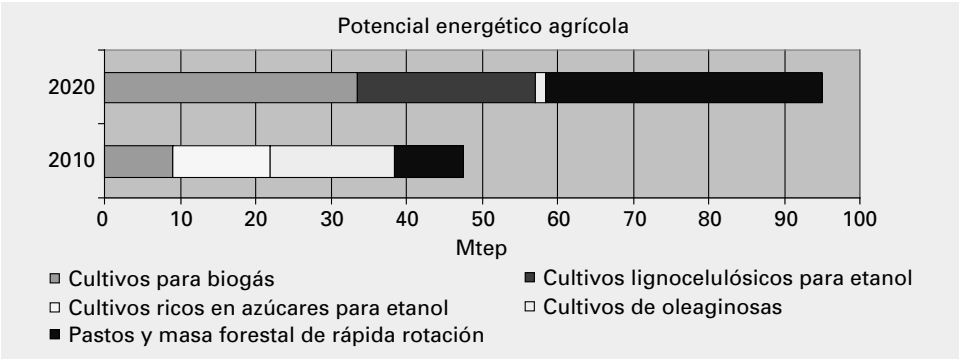


Figura 10.18. Estimación, en Mtep, de los recursos procedentes de la agricultura.

paña. Estos objetivos son difíciles de alcanzar si se tiene en cuenta que en 2006 había una capacidad de 354 MW, muy lejos de los 2.039 MW fijados para 2010. En primer lugar del ranking europeo lo encabeza Francia con 8,6 millones de tep, seguido por Suecia (7,9) y Alemania (7,8). España se sitúa por detrás de Finlandia y Polonia con 4,4 Mtep.

A la espera del seguimiento de una política común, la mayoría de los gobiernos de la UE han desarrollado sus propios modelos. Algunos ejemplos son:

- En enero de 2006, el Parlamento sueco aprobó una ley cuya finalidad es aumentar la electricidad generada a partir de fuentes renovables en 12 TWh ($10{,}32 \cdot 10^6$ tep) entre 2007 y 2016.
- En Alemania una reciente ley de apoyo a las renovables permitió pasar de 1,5 TWh en 2003 a 5,4 TWh en 2005. Ello se ha logrado gracias al otorgamiento de una prima ligada a los diversos tipos de biomasa desde 25 €/MWh hasta 60 €/MWh, para el uso y desarrollo de nuevas tecnologías de conversión energética.
- En Austria solo en 2005 se instalaron 136 MWh, casi un 60% que en 2004. Ello ha provocado que el precio de una tonelada de pelets aumente de 178 a 265 €. Tomando un valor intermedio de 200 €/t, la prima supone un pago de 0,050 €/th, es decir el doble del gas natural.

En resumen, para 2010 la UE ha planificado cubrir las expectativas de energía procedente de la biomasa (190 Mtep) de la manera siguiente:

- Biorresiduos: 103 Mtep.
- Masa forestal: 42 Mtep.
- Cultivos agrícolas: 47 Mtep.

Para alcanzar este objetivo, es preciso trabajar en todos los frentes.

7.1. LOS INCENDIOS FORESTALES

En España, sólo en el año 2005, ardieron 153.446 hectáreas. Por lo general esta cifra incluye matorral y monte abierto, siendo masa forestal la mayoría. En Cataluña (donde hay 400 árboles por persona y bosques en expansión), las cifras aparecen en la Tabla 10.39.

Tabla 10.39. Incendios en Cataluña (1992-2005)

Periodo	1992-2005
Total	13 años
Total hectáreas quemadas	146.611
Promedio anual	11.278 ha/año
Superficie replantada	7.072 ha
Promedio anual	544 ha/año
Superficie arbolada	2.277.121 ha
% de superficie ocupada por la masa forestal	69%

Hace un siglo la superficie ocupada por la masa forestal no llegaba al 30% del territorio. Ello se explica por la ocupación masiva de la mano de obra en el campo. Hoy en día el sector primario no alcanza el 3% de la fuerza laboral; esto se traduce en que los cultivos tradicionales han sido abandonados y su lugar ha sido ocupado por el bosque. Sin embargo, la primera reflexión debería ser: si la distribución del trabajo ha cambiado: ¿por qué no aplicar la misma filosofía al territorio? Es decir, ¿por qué no se planifica el territorio de manera que una parte de esta masa forestal se aproveche racional y sosteniblemente? Si se planifica la tala de una parte de la masa forestal se evitarían muchos incendios o bien estos no tendrían la envergadura que reflejan las estadísticas.

En cuanto a la actividad de replantación, al cabo de 20 años el «nuevo bosque» se muestra raquítico y presenta un desarrollo muy deficiente. Todo lo cual avala la hipótesis de que es mejor talar y planificar a que se produzca un incendio. Los expertos añaden

que una buena planificación podría reducir los incendios, como mínimo a la mitad. Por otra parte hay que señalar que, en España, las Comunidades Autónomas han creado una estructura en torno al fuego que emplea a 40.000 personas y destina más de 700 millones de euros al año.

A primeros de 2007 han salido a la luz pública numerosos informes derivados del principal «El cambio climático». ¿De qué manera puede afectar el progresivo aumento de las temperaturas en cuanto a los incendios? El problema no es directo. La subida de temperaturas va asociada a una carencia de lluvias en la mayor parte de España, lo que hace aumentar mucho el riesgo de incendios forestales. El informe concluye qué zonas de España que no eran de riesgo, a partir del 2040 o antes, lo serán. Se calcula que la zona de riesgo en estos años habrá aumentado un 40-50%. No hace falta decir que el incendio conlleva pobreza del suelo y erosión, lo que a su vez, realza el riesgo.

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) presentó en Roma el 18º informe de su Comité Forestal. En él se informa que España ha aumentado en el periodo 2000-2005 la superficie forestal en 296.000 hectáreas anuales de promedio. El mismo informe señala un dato inquietante para España pues afirma que una quinta parte de su territorio sufre un elevado índice de desertificación (proceso de degradación de las zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas, es decir una pérdida de productividad del suelo a la que contribuye decididamente la actividad humana).

Paralelamente, la asociación Europea de la Industria de la Biomasa y el Fondo Mundial para la Naturaleza afirma que la utilización energética de la biomasa permitiría reducir las emisiones de CO_2 en cerca de mil millones de toneladas anuales y podría satisfacer, dentro de quince años, el 15% de la demanda eléctrica de los países industrializados.

7.1.1. Producción de biomasa de un bosque mediterráneo

El término biomasa forestal, habitualmente empleado por extensión, es diferente conceptualmente al de los residuos forestales y, por tanto, no equivalentes: mientras que los residuos forestales proceden de forma exclusiva de las actividades forestales (cortas finales, talas, claras, clareos, desbroces de matorral, etc.), la biomasa forestal, en cambio, representaría toda la materia viva presente en el monte, incluyendo, obviamente, la no maderera.

Desde el punto de vista de la valorización energética, el aprovechamiento de los residuos forestales presenta las siguientes ventajas:

- Aumento de la productividad del sector forestal, al aportar una nueva fuente de ingresos para los materiales habitualmente considerados como residuales.
- Generación de puestos de trabajo en toda la cadena productiva.
- Menor dependencia de los combustibles fósiles.
- Disminución del riesgo de incendios y plagas forestales.

La Tabla 10.40 muestra las principales características de producción de un bosque típico mediterráneo. Se sobreentiende que la tala se va a llevar a cabo sobre zonas diferentes ya que una tala anual del 10% sería insostenible.

Tabla 10.40. Producción de biomasa de un bosque mediterráneo

Producción media	300 t/ha
Humedad media de corte	55%
Tala total (cada 25 años)	
Rendimiento de tala total	84%
Cantidad cosechada	252 t/ha
Desechos abandonados en bosque	48 t/ha
Tala parcial (anual)	
Intensidad aconsejada	10%
Cantidad cosechada	30 t/ha y año
Desechos abandonados en bosque	25,2 t/ha y año

Es evidente que aunque se trate de una biomasa de rápido crecimiento, no se puede pensar en una tala total (aunque existen disposiciones oficiales que obligan a cortar la masa arbolada en las cercanías de pueblos y urbanizaciones como medida de seguridad). El ejemplo presente (Tabla 10.41) postula una tala muy moderada.

Tabla 10.41. Actuación sostenible en un bosque mediterráneo

Superficie (ha) de tala total	3.500 ha/año
% biomasa recuperada (tala + desechos)	90%
Cantidad de biomasa obtenida por tala total	945.000 t/año
Superficie (ha) de tala parcial y limpieza	1.000 ha/año
% biomasa recuperada (limpieza)	70%
Cantidad de biomasa	210.000 t/año
Total biomasa recuperada	1.155.000 t/año

La superficie total que se propone talar (3.500 hectáreas) equivale al 30% de la superficie quemada anualmente, referida a la media de los últimos 13 años. Las ventajas son evidentes:

- Se recuperaría una cantidad de biomasa importante, para diferentes métodos de valorización.
- La energía primaria que representa esta biomasa equivale a 500.000 tep.
- Se evitaría, en parte, el gasto en extinción de incendios.
- Menos daños personales y al ecosistema.

7.1.2. Energía disponible de forma sostenible

Siguiendo con los datos del ejercicio de las tablas anteriores, la Tabla 10.42 muestra el potencial energético que representa la biomasa extraída.

Tabla 10.42. Potencial energético de la biomasa extraída

PCI estimado	4.131 kcal/kg (4,80 kW/kg)
Tiempo de almacenamiento	6 meses
Humedad de trabajo	44%
PCI útil de la biomasa a usar	2.050 kcal/kg (2,38 kW/kg)

Con los datos obtenidos en la Tabla 10.42 se construye la Tabla 10.43, la cual propone un ejemplo consistente en la construcción de una planta de generación de electricidad a partir de la biomasa recuperada. Como se ha indicado, se trata de un ejemplo, ya que:

- No es operativa una planta de la potencia resultante. Se deberían construir plantas con potencias teóricas entre 1 y 5 MW(e).
- Hay que analizar bien la situación para solventar y racionalizar los abastecimientos y transportes.

Como se desprende de la Tabla 10.43, la energía generada es muy importante y rentable teniendo en cuenta que la prima que aplica a la energía eléctrica procedente de biomasa es muy elevada (casi el doble de la hidráulica).

Tabla 10.43. Capacidad de generación de electricidad

Tiempo estimado de funcionamiento	7.500 h/año
Biomasa precisa para el proceso	154 t/h
Energía primaria disponible	367.026 kW
Rendimiento eléctrico de la conversión	19%
Potencia eléctrica generada	69.735 kW
Energía eléctrica generada	523.012.123 kW · h/año

7.2. EL BOSQUE COMO SUMIDERO DE CO_2

La biomasa, al menos durante su etapa de crecimiento, actúa como sumidero de CO_2. Por esto aunque el balance de CO_2 por el uso de biomasa sea neutro debe de existir un balance entre el empleo de biomasa y la replantación de masa forestal. Llevando este razonamiento al extremo se demostraría que si se talara toda la biomasa, no existiría vegetación para absorber el CO_2 generado en la conversión energética.

Por ello la Tabla 10.44, siguiendo el mismo ejemplo anterior, muestra que la cantidad de tala prevista es sostenible ya que la biomasa cortada no sobrepasa el valor que los expertos consideran biológicamente sostenible de 20 t CO_2/ha. Es decir, no es conveniente llevar a cabo una tala tal que su poder de fijación supere la cifra indicada.

Tabla 10.44. Sostenibilidad de la biomasa talada

Cantidad de CO_2 global emitida	1.090.936 t CO_2/año
Total superficie (ha) tratadas	13.500 ha/año
Cantidad de CO_2 global emitida por ha	80,8 t CO_2/año · ha
% de biomasa que dejará de captar CO_2	26%
Cant. de CO_2 a efectos de sustentabilidad	21,0 t CO_2/año · ha
Cant. de CO_2 considerada sostenible	20,0 t CO_2/año · ha

7.2.1. Aspectos económicos

En el sentido de la sostenibilidad de los ecosistemas, el Protocolo de Kyoto propone la plantación masiva de masa forestal para obtener bonos de CO_2. Sin embargo, esto, como se ha visto en el apartado anterior es compatible con la tala sostenible de los bosques.

En algunas partes de España, lamentablemente, se promueve la quema con finalidades especulativas. Algunas comunidades, como Cataluña, ya decretó hace años que una superficie quemada no podría recalificarse para otro uso. De esta manera se corta de raíz la especulación inmobiliaria y se preserva el medio ambiente. Sin embargo existe otra variante de la desaparición de la biomasa forestal que puede resultar igual de perversa. Muchos propietarios forestales no obtienen rendimiento económico alguno de la explotación de sus bosques y, si se queman pueden obtener una indemnización.

Es en esta última hipótesis que el ejemplo propuesto quiere demostrar que la valorización energética de un bosque es más rentable de lo que a primera vista parece. La Tabla 10.45 presenta las conclusiones.

Tabla 10.45. Aspectos económicos de la conversión energética de un bosque

Energía por superficie (ha)	38.742 kW · h/ha y año
Precio estimado de venta de esta energía	0,095 €/kW · h
Ingreso por ha	3.680 €/ha y año
Pago por madera calcinada	12,0 €/t
Madera por ha	300 t
«Beneficio total», en 25 años	3.614 €/ha y 25 años

Como se desprende de la tabla, el beneficio de la venta de energía eléctrica, en un año, supera la indemnización que se puede obtener en los 25 años en que se ha estimado la recuperación del bosque.

Actuaciones drásticas, como la que recientemente ha aprobado el Congreso de California, que obligará a pagar a las industrias por las emisiones de CO_2, fomentará el uso de la biomasa, ya que al margen de la conversión en electricidad (como el indicado en el ejemplo anterior), la conversión energética térmica es mucho más efectiva puesto que es fácil conseguir una tasa de aprovechamiento del 85%.

7.2.2. Nuevas aplicaciones del CO_2

Los gases de combustión de las calderas de las centrales térmicas, y en general combustiones, contienen cantidades de dióxido de carbono que oscilan del 10 al 16% en volumen. Si el gas se disuelve en agua se convierte en ácido carbónico, ácido débil, susceptible de reaccionar con compuestos alcalinos y lograr la neutralización. La reacción básica es:

$$CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3$$

El ácido formado puede tener diversas aplicaciones:

- Neutralizar los residuos con elevado contenido en sosa cáustica: $2\ NaOH + H_2CO_3 \rightarrow Na_2CO_3 + 2\ H_2O$
- Otro sistema es el empleo directo del carbónico en el agua de las piscinas. Por lo general el agua tiene tendencia a aumentar de pH. Para hacer disminuir el pH se disuelve el ácido en el agua.

En todos los casos el único gasto estriba en el sistema de remover el gas de la chimenea que contiene CO_2, dentro de la masa de agua.

En Austria se está investigando la introducción de los gases de síntesis oxidados (CO_2, H_2O con trazas de NO_x) en los reactores de fangos activados. El CO_2, durante el día, acelera la generación de biomasa, se recupera, por condensación, el agua y el NO_x no produce ningún efecto nocivo.

7.3. UN NUEVO CONCEPTO DE GASIFICACIÓN DE BIOMASA

Se trata de una gasificación en la que el agente gasificante es, exclusivamente, vapor de agua. De entrada ello conlleva la ventaja de que el gas de síntesis generado es muy rico en H_2, CO e hidrocarburos.

El sistema de gasificación desarrollado por Repotec, en Austria, consiste en una gasificación con cogeneración y aprovechamiento total del calor residual, bajo los siguientes parámetros:

- Alimentación: pelets de biomasa (recién cortada) con un tamaño máximo de 50 mm.
- Generación de 2.000 kW (eléctricos) que básicamente se envían a la red pública si bien abastece a las necesidades de electricidad de la localidad y el polígono industrial allí instalado.
- Producción de 4.500 kW (térmicos), procedentes de calores residuales, que se utilizan en el «*district heating*» de los habitantes de la localidad y el polígono industrial.

Como muestra la Figura 10.19, el principio de funcionamiento de la instalación es como sigue:

- En el gasificador, de lecho fluifizado, la biomasa es gasificada con vapor a una temperatura de 850 ℃, con la ventaja de una baja generación de alquitranes.
- La parte de coque generado, así como restos de madera sin gasificar y, naturalmente también los áridos son introducidos en un reactor de oxidación (combustor) donde se oxidan completamente los compuestos carbonosos. Los áridos son devueltos al gasificador.
- El árido usado en el lecho es olivino, que hace las veces de catalizador y neutralizador de los gases ácidos.
- Los gases de combustión son enviados a la chimenea, después de pasar por un intercambiador de calor y un filtro.
- Los impropios se evacuan por la parte inferior como cenizas.
- El gas de síntesis atraviesa un primer intercambiador de calor, donde la temperatura desciende

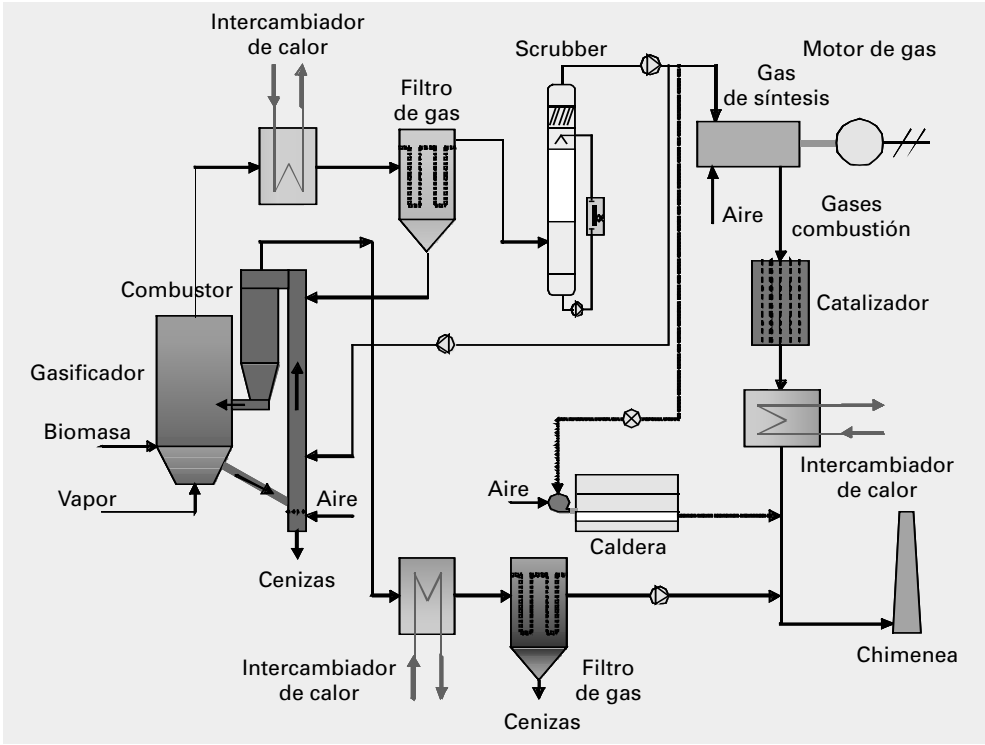


Figura 10.19. Sistema avanzado de gasificación de biomasa.

hasta unos 450 ℃, temperatura a la que no puede condensar ningún hidrocarburo. El calor es recuperado y se emplea.

- El gas de síntesis pasa por un filtro de mangas de alta temperatura, básicamente para la retención de material particulado. Éste se devuelve al combustor para la valorización total.
- Seguidamente el gas entra en un *scrubber* para la limpieza final.
- El gas de síntesis depurado, y frío, es impulsado por un ventilador hacia el motor de cogeneración. Una pequeña parte del gas es reintroducido en el sistema, como aportación de calor al combustor.
- Finalmente el gas se oxida en un motor que, con un rendimiento cercano al 30%, genera electricidad (2 MW) y una serie de caudales residuales de calor. Incluyendo la electricidad y el calor la eficiencia del motor supera el 85%.
- Los gases de escape atraviesan primero un catalizador y después un intercambiador de calor, hasta recuperar todo el calor posible antes de ser emitidos a la atmósfera.

La reacción exotérmica que tiene lugar en el combustor genera el calor para la vaporización del agua, cuyo vapor se usa en la gasificación.

7.3.1. Otras posibilidades de gasificación de diversas biomasas

Uno de los sistemas de gasificación adecuado para la biomasa es el desarrollado por ITI Energy Limited, que se trata de un lecho fluidizado fijo patentado como gasificador *down-updraft*, incluyendo los equipos necesarios para acondicionar el gas de síntesis para que su valorización sea compatible con motores de combustión interna convencional o del tipo «*dual fuel*», así como con ciclo convencional caldera-ciclo vapor, para la producción simultánea de electricidad y energía térmica.

Los residuos densos, debidamente desmenuzados, o los pellets/briquetas son cargados, mediante una válvula rotativa que asegure la estanquidad del proceso, y son introducidos por la parte superior del reactor donde caen dentro de la primera sección secadora del gasificador. A continuación, los residuos fluyen durante un cierto tiempo hasta las zonas de pirólisis y gasificación; la temperatura del proceso crece de manera progresiva hasta llegar a un máximo dentro de la zona central del reactor.

Un anillo secundario de inyección de aire, situado en la parte inferior de la sección cónica superior del reactor, asegura la aportación de la cantidad de aire necesaria para mantener activos los procesos de gasificación, pirólisis y secado.

En la cuello de la parte cónica superior la temperatura alcanza un máximo del orden de los 1.200 ℃; a continuación se produce la oxidación del carbono residual. Las cenizas fluyen por gravedad hasta la parte inferior del reactor donde se enfrían y se extraen mediante un transportador de tornillo. El gas de síntesis abandona el reactor a relativa baja temperatura (350-500 ℃); el calor cedido se emplea en precalentar la masa entrante, lo que, a la vez, sirve para eliminar alquitranes.

Un ventilador situado en la parte fría del flujo descendiente inyecta el aire necesario al proceso a una presión inferior a la atmosférica. La cinética del proceso de gasificación está controlada por medio de la velocidad del ventilador.

El gas de síntesis resultante se trata, en primer lugar, en un ciclón y, a continuación, en un scrubber húmedo asegurando la separación de las partículas, cenizas y gases solubles en el agua. Las partículas con tamaño inferior a 10 micras son separadas en un filtro electroestático húmedo (WESP) lo que permite garantizar la producción de un gas frío y limpio.

El «*syngas*» alimenta, vía un filtro de limpieza, el motor de combustión interna acoplado con un generador eléctrico. Una antorcha completa el equipo para la destrucción del mismo durante las puestas en marcha o paros no programados. La Figura 10.20, muestra el esquema del reactor y perfil de temperaturas.

La Tabla 10.46 muestra una composición típica del gas de síntesis oxidado.

Tabla 10.46. Composición del gas una vez oxidado (ND = No Detectado, Trazas)

Parámetros	Unidad	Nivel de emisiones
CH_2	Vol %	ND (*)
CO_2	Vol %	2-12
O_2	Vol %	5-4
N_2	Vol %	60-90
H_2O	Vol %	5-10
CO	ppmv	200-500
NO_x	ppmv	0-200
SO_2	ppmv	0-300
SO_3	ppmv	0-20
CH_4	ppmv	ND
H_2S	ppmv	ND
HCl	ppmv	ND
NH_3	ppmv	ND
THC	ppmv	0-0,2
Dioxinas y furanos	ppmv	ND

(*) ND: no detectado.

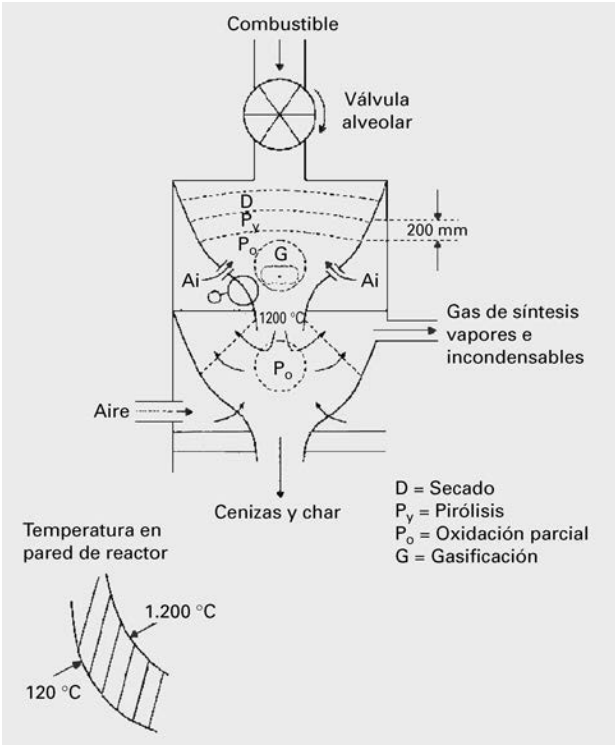


Figura 10.20. Esquema reactor de gasificación *down-updraft.*

La Tabla 10.47 muestra las características del gas de síntesis resultante de la gasificación de diversos residuos.

La Tabla 10.48 muestra la caracterización de los gases de síntesis obtenidos a partir de la gasificación de los residuos antes citados.

La Tabla 10.49 muestra las temperaturas registradas durante el proceso de gasificación.

El grado de humedad aceptable para el proceso ITI se sitúa entre 10 y 25%. Este intervalo se estima óptimo para el proceso. Cuando se segrega la fracción fermentable mediante un tromel, la fracción residual de los RSU, o sea los RDF, compuestos por una mezcla de papel, cartón, plásticos, textiles, embalajes diversos, madera, etc., presentan un grado de humedad compatible con estos rangos.

La firma IGT también ha publicado los resultados obtenidos en la gasificación de otros residuos especificados en la Tabla 10. 50, que si bien no son técnicamente biomasa (neumáticos), o no lo son del todo (RSU), por su interés se reproducen.

La Tabla 10.51 muestra el análisis del gas de síntesis obtenido así como el PCI del gas, mientras que la Tabla 10.52 indica los parámetros de funcionamiento del reactor durante los ensayos con los diversos residuos.

Tabla 10.47. Análisis de diversos residuos

Parámetro	Fangos deshidratados	Cáscaras de almendras	Residuos de madera	Residuos de cuero
Tamaño (mm)	35 x 10 x 5	18 x 16,5 x 8,5	50 x 30 x 8,5	70 x 50 x 50
Densidad absoluta (kg/m^3)	315	944	836	945
Densidad aparente (kg/m^3)	230	319	250	537
C (%)	39,5	46,7	43,4	43,6
H (%)	6,2	5,7	6,1	6,9
O (%)	25,5	45,8	46,3	32,3
N (%)	3,9	0,22	0,7	10,8
S (%)	1,5	0,7	0,4	1,5
Cenizas (%)	23,5	0,7	3,1	4,9
Humedad (%)	11,7	12,4	14,8	11,2
Fracción volátil (%)	53,5	62,7	64,8	65,7
Carbón fijo (%)	11,3	24,1	17,2	18,2
PCS (IGT) (MJ/kg)	17,86	18,08	17,20	20,54

Tabla 10.48. Composiciones de los diversos gases de síntesis

Componentes del gas	H_2 (% seco)	O_2 (% seco)	N_2 (% seco)	CH_4 (% seco)	CO (% seco)	CO_2 (% seco)	C_2H_2 (% seco)	C_2H_6 (% seco)	PCI (MJ/Nm^3)
Fangos deshidratados	9,25	1,28	63,04	1,83	13,39	9,63	1,13	0,43	4,82
Cáscaras	13,13	0,93	53,33	2,18	20,66	9,52	0,15	0,11	5,40
Madera	16,58	0,07	53,38	2,04	14,32	13,22	0,27	0,13	5,11
Cuero	10,12	0,28	56,39	1,11	21,43	10,16	0,23	0,28	4,92

Tabla 10.49. Distribución de temperaturas durante el proceso

Temperatura	Centro reactor T1(°C)	Pirolisis T2(°C)	Secado T3(°C)	Salida del gas T4(°C)	Entrada al motor T5(°C)
Fangos deshidratados	1.100	500	150	300	35
Cáscaras	1.250	560	170	320	40
Madera	1.150	500	130	280	30
Cuero	1.280	590	180	350	45

Tabla 10.50. Análisis de diversos residuos

Componentes	Neumáticos	Hueso aceituna	RDF (RSU)
Tamaño (mm)	1,5 x 0,5 x 1,5	70 x 50 x 70	20 x 30 x 20
Densidad absoluta (kg/m^3)	NA	897	NA
Densidad aparente (kg/m^3)	NA	502	NA
C (%)	NA	48,0	46,7
H (%)	NA	5,9	6,2
O (%)	NA	32,6	29,9
N (%)	NA	1,5	0,7
S (%)	1,9	0,5	0,3
Cenizas (%)	3,6	11,8	16,9
Humedad (%)	1,2	10,1	5,4
Materia volátil (%)	65,8	58,7	61,1
Carbón fijo (%)	29,4	19,3	16,6
PCS (IGT) (MJ/kg)	35,01	18,03	20,25

Tabla 10.51. Composiciones de los diversos gases de síntesis

Gas de síntesis	H_2 (% seco)	O_2 (% seco)	N_2 (% seco)	CH_4 (% seco)	CO (% seco)	CO_2 (% seco)	C_2H_2 (% seco)	C_2H_6 (% seco)	PCI (MJ/Nm^3)
Neumáticos	10,60	1,01	40,06	2,80	25,13	19,53	0,98	0,71	6,77
Hueso aceituna	10,01	1,80	61,10	2,50	12,90	10,10	1,30	0,17	5,04
RDF	12,15	1,20	52,00	2,73	18,17	12,23	1,09	0,43	6,05

Tabla 10.52. Distribución de temperaturas durante el proceso

Temperatura	Centro reactor T1(°C)	Pirolisis T2(°C)	Secado T3(°C)	Salida del gas T4(°C)	Entrada al motor T5(°C)
Neumáticos	1300	700	300	450	42
Hueso Aceituna	1150	450	140	250	37
RDF	1210	600	230	300	40

7.3.2. Posibilidades del gas de síntesis

El sistema de gasificación de REPOTEC antes descrito tiene otras posibilidades que están siendo desarrolladas por la Universidad Politécnica de Viena. En la propia planta hay tres anexos, con sendas plantas piloto para:

- Producción de SNG (*Substitute Natural Gas*), es decir, se produce un gas compuesto sólo por H_2, CO e hidrocarburos ligeros que es un auténtico sustituto del gas natural. Para ello el gas ha de tener un porcentaje de CH_4 superior al 96%, menos de un 0,5% de O_2 y menos de 0,5 ppb de H_2S.
- Obtención de hidrógeno para su empleo en una pila de combustible.
- Obtención de biocombustible, muy semejante al gasóleo, a través de la síntesis de Fischer-Tropsch.

En resumen, las posibilidades del gas de síntesis procedente de una planta de gasificación de biomasa no se reducen simplemente a la generación de energía sino que como se ve existen otras alternativas.

7.3.3. Ejemplo de una población sostenible

Güssing es una pequeña localidad situada en el sudeste de Austria (en el estado de Burgenland) tradicionalmente con una economía deprimida puesto que su principal fuente de riqueza es la ganadería y la explotación forestal. Las autoridades regionales y estatales decidieron, con la ayuda de la UE, instalar un centro de conversión energética de la biomasa, en colaboración con los propietarios forestales, bajo los siguientes principios:

- Se instalaría una fábrica para la producción de parquet, a partir de los troncos de los árboles mejores (mejora de la explotación forestal).
- La fábrica de parquet se abastecería de calor y electricidad de la planta de generación de energía.
- Todos los habitantes de la localidad de Güssing tendrían calefacción y energía eléctrica procedente exclusivamente de la planta de generación de energía.
- Se crearía un centro de investigación y desarrollo de energías renovables en el municipio.

El proyecto que comenzó en 2000 culminó completamente en 2003 (la planta de energía entró en funcionamiento en 2002). Desde entonces se han creado varios puestos de trabajo y la localidad de Güssing es completamente autónoma en términos energéticos. Es decir, sólo depende de su propia biomasa.

Además la planta puede funcionar con pelets a base de biomasa y plásticos residuales con lo que se abre la posibilidad de emplear otros residuos de difícil reciclaje pero de alto PCI. La Figura 10.21 muestra una foto de la mencionada planta de valorización energética de Güssing.

En el DVD adjunto, en el punto 10, se muestra información sobre un sistema de gasificación de fangos de EDAR.

Figura 10.21. Planta de gasificación de biomasa.

7.4. POSIBILIDADES DE LA PIRÓLISIS DE LA BIOMASA

Hay otra manera de valorizar energéticamente la biomasa: la pirólisis flash. El sistema comienza por una pirólisis a alta temperatura con un tiempo de residencia de los gases muy corto. El resultado del proceso es, en términos de porcentaje de masa, aproximadamente:

- 25% de gases y vapores ligeros, que se emplean para calentar el reactor puesto que las reacciones de pirólisis son endotérmicas.
- 65% de aceites pirolíticos. Que una vez purificados se combustionan en una turbina para generar electricidad.
- 10% de coque.

Una aplicación de este sistema es su implantación en una industria cerámica donde el gas, o coque de petróleo (combustibles usualmente empleados en esta industria), pueden ser sustituidos por el aceite pirolítico, ya que se comporta como un gasóleo ligero.

El coque generado se puede valorizar en la formulación de la propia pasta cerámica, lo que transforma el sistema en un proceso de residuo cero. A la vez, el coque aporta calor durante el proceso cerámico, lo que conduce a un ahorro de energía adicional en la cocción del material.

El sistema más racional parece ser la de generar aceite para la sustitución de los combustibles fósiles, con lo que se evita el recargo debido al Protocolo de Kyoto con que está gravada esta industria. Una parte del aceite se puede almacenar y, durante las horas en que la energía eléctrica se paga mejor, vender electricidad. La Figura 10.22 muestra una foto de la turbina Orenda, de 4 MW (eléctricos), especialmente diseñada para consumir este combustible.

La turbina tiene un rendimiento eléctrico del orden del 30%. Sin embargo presenta la ventaja que los efluentes sólo se producen en forma de gases calientes (a 450 ℃), lo que representa una gran mejora para su aplicación en el secado de la industria cerámica.

Por otra parte, la generación y empleo de aceite en lugar de gas, presenta la ventaja de un fácil almacenamiento y transporte.

En el DVD adjunto, en el punto 11, se muestran diversas disposiciones de cogeneración.

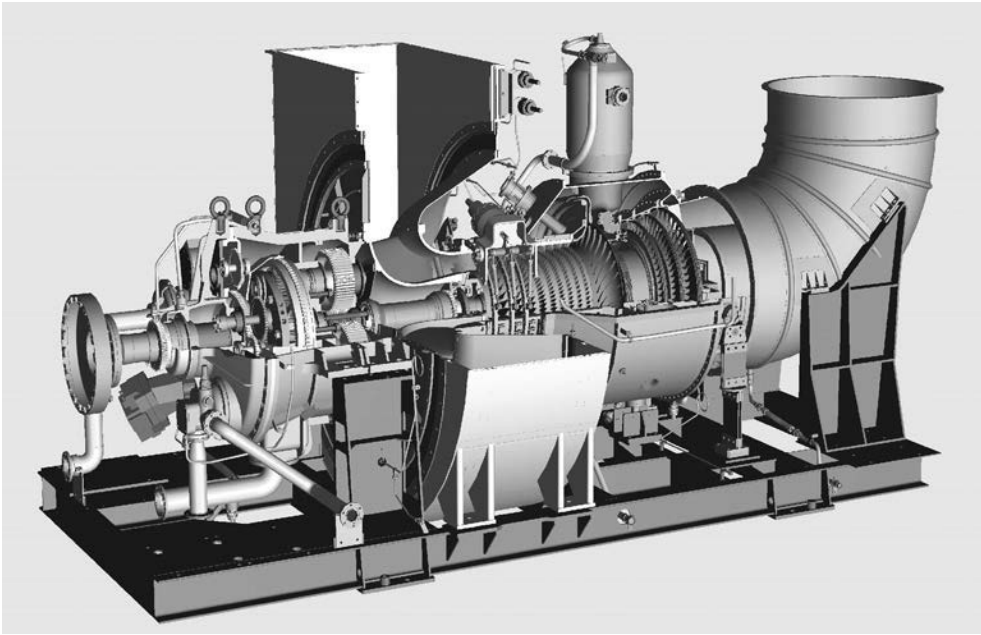


Figura 10.22. Turbina Orenda: producción de electricidad a partir de aceite pirolítico.

7.4.1. Pirólisis avanzada de la biomasa

Al igual que sucede con la gasificación, en los últimos tiempos, básicamente a partir de 2000, se han desarrollado una serie de sistemas de pirólisis avanzados para valorizar la biomasa, y otros residuos.

En concreto, el sistema «btg» (*Biomass Technology Group*) consiste, como muestra el esquema de la Figura 10.23, en un craqueo de la biomasa gracias a la entrada de arena caliente procedente del reactor de lecho fluidizado. La arena entra a 550 ℃ junto a la biomasa a una cámara de mezcla. En el primer reactor ambos elementos se mezclan, en una proporción aproximada de 20 a 1 a favor de la arena; esto supone que se mantenga una temperatura elevada, suficiente para romper las largas cadenas celulósicas (craqueo) y obtener dos productos elementales: el char (mezcla de coque e hidrocarburos complejos) y aceites pirolíticos (mezcla de gases y vapores).

El char sale junto a la arena y se envía a un reactor de lecho fluidizado donde combustiona. Por la parte superior del reactor salen los gases: básicamente CO_2 y H_2O, pero también gases inquemados (CO) y los impropios que llevaba el combustible. Estos últimos son separados en un ciclón. La combustión que tiene lugar genera mucho calor y como es conveniente no supera los 800 ℃; dentro del lecho existe un serpentín que genera vapor de agua y así se mantiene la temperatura interna dentro de unos límites preestablecidos.

Los aceites, en fase vapor a 500 ℃, que es la temperatura de la cámara de mezcla, se envían a un condensador. Al condensar, los gases se separan del aceite y se juntan con los procedentes del reactor hacia una caldera de recuperación.

El aceite se valoriza en una turbina. La turbina Orenda tiene un rendimiento eléctrico del 30%, el resto son gases a 500 ℃ que pueden también enviarse a la caldera de recuperación para generar más vapor. No obstante esta turbina tienen la particularidad de que una parte del vapor puede inyectarse en las propias cámaras de combustión de la turbina con lo que el rendimiento eléctrico se aproxima al 35%.

La configuración que aparece en la Figura 10.23 puede alcanzar un rendimiento global (electricidad más calor) del 85%. En comparación con la gasificación avanzada antes descrita presenta unas diferencias:

- El sistema de gasificación presenta mayor rendimiento eléctrico (del orden del 35% sobre la energía entrante en el sistema), mientras que la pirólisis descrita y turbina de aceite, en ciclo abierto y sin vapor, difícilmente alcanza el 20%.
- La gasificación no permite almacenar el gas de síntesis, mientras que el aceite pirolítico se puede almacenar y poner en marcha la turbina cuando sea conveniente.

Obviamente la elección de uno u otro sistema, con rendimientos energéticos globales muy similares, dependerá de las necesidades energéticas de cada caso: relación energía térmica/eléctrica.

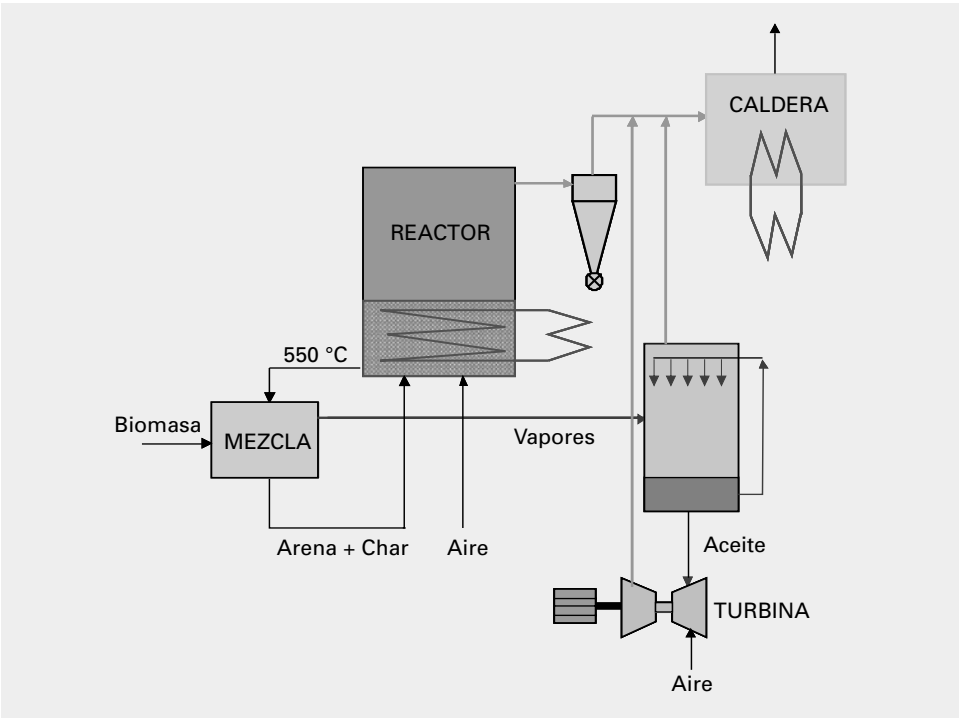


Figura 10.23. Síntesis del sistema de pirólisis avanzada de biomasa.

7.5. ESTADO DE LA TECNOLOGÍA EN LA OBTENCIÓN DEL HIDRÓGENO A PARTIR DE LA CONVERSIÓN ENERGÉTICA DE LA BIOMASA

Los sistemas de conversión termoquímicos (combustión, gasificación y pirólisis) han sido comentados a lo largo de este capítulo; los bioquímicos convencionales (fermentaciones anaeróbias, digestiones, codigestiones, etc.) también se han citado, si bien se han desarrollado en otros capítulos, como el 3. El presente apartado se va a destinar a la posibilidad de obtención de hidrógeno a partir de la biomasa.

El punto de partida de los sistemas es la obtención de un gas; en el presente capítulo se ha comentado la posibilidad de producir H_2 para accionar pilas de combustible a partir del gas de síntesis generado por la gasificación de la biomasa. El hidrógeno es un vector energético que cada día despierta más interés ya que se permite su conversión energética de manera respetuosa con el medio ambiente, si procede de una fuente renovable, de ahí su conexión con la biomasa.

El hidrógeno es el elemento más abundante del universo y está presente en el 75% de toda la materia. La atmósfera contiene cerca del 0,07% de hidrógeno y la superficie de la tierra el 0,14%.

A pesar de ser el elemento más liviano que se conoce, con una densidad de 0,09 g/l, posee una elevada densidad energética (122.000 kJ/kg o 29.137 kcal/kg), es decir cerca de siete veces la densidad energética de una biomasa. Por tanto, se tratará de buscar el sistema de obtener hidrógeno a partir de la biomasa. Los sistemas más desarrollados son:

Proceso de producción biológica del hidrógeno. La mayor parte del hidrógeno presente en la atmósfera proviene de la fermentación biológica de la biomasa, donde los microorganismos transforman la materia orgánica en CO_2 y H_2. El hidrógeno como gas es usado directamente en el mismo ecosistema. El proceso biológico de producción de hidrógeno es fundamentalmente dependiente de la presencia de una enzima que cataliza la simple reacción: $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$. Muchos microorganismos contienen enzimas, hidrogenasas, que desarrollan la oxidación del H_2 en protones y electrones. El proceso de producción biológica de hidrógeno se puede clasificar en:

- Biofotolisis del agua por algas y cianobacterias.
- Fotodescomposición de los compuestos orgánicos por medio de bacterias fotosintéticas.
- Procesos de fermentación de compuestos orgánicos.

Considerando estas opciones, el sistema para obtener hidrógeno a gran escala comprendería un sistema híbrido de bacterias fotosintéticas y fermentativas.

La reacción de base para la producción de hidrógeno por parte de las bacterias fotosintéticas es la siguiente:

$$C_6H_{12}O + 6\ H_2O \rightarrow 12\ H_2 + 6\ CO_2$$
(en presencia de luz solar)

El monóxido de carbono también puede ser utilizado para obtener hidrógeno:

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$$

Los procesos de fermentación permiten obtener una mayor cantidad de hidrógeno por parte de los microorganismos, aunque las reacciones necesarias son más complejas y el producto final es una mezcla de gases en las que también se encuentra CH_4, CO y H_2S.

8. Caracterización de los residuos para su valoración energética

En la parte final de este capítulo se ha escogido la combustión como tecnología de valorización energética de la biomasa en contraposición a la pirólisis y la gasificación porque es la técnica más utilizada hoy en día. Una vez elegida, se analiza la importancia de la composición de la biomasa en la elección como combustible para dicha técnica. Así mismo, en la parte final de este capítulo se ahonda en la vertiente técnico/científica de la combustión para justificar los aspectos tecnológicos de implantación.

La ventaja que presentan los residuos forestales y agrarios frente a los residuos urbanos e industriales es su alta composición orgánica y menor presencia de contaminantes. Por tanto, es muy importante que en la elección del residuo tenga un bajo contenido de inorgánicos, puesto que éstos generan más inquemados y gases contaminantes a la atmósfera conllevando mayores costes de operación en la etapa de limpieza de gases.

Para hacer un estudio sobre valorización energética de los residuos forestales y agrarios, en primer lugar se debe llevar a cabo una evaluación exhaustiva de la zona geográfica. En este punto hay que preguntarse, dependiendo de la cantidad de residuo y tipo del mismo, cuánta energía se puede generar, por ello es tan importante hacer un análisis de la composición del residuo. Se puede poner de ejemplo, para garantizar este tipo de instalaciones, la planta de Sangüesa (Navarra, España) que es alimentada por 160.000 toneladas/año de paja de cereal de donde se obtienen 2.000 GWh al año, funcionando la planta 8.000 horas anuales, lo cual demuestra que este tipo de combustible es rentable para la producción de electricidad.

Una vez analizada la zona hay que realizar un estudio de la composición de los posibles residuos a usar, mediante la determinación de sus características fisicoquímicas. De este análisis se obtendrán las conclusiones si es viable técnica y económicamente la combustión de dicho residuo. En términos de conversión energética, esta mezcla de residuos se denomina «menú». Las máquinas térmicas se diseñan en términos de energía, si bien son alimentadas en unidades de masa a la hora. El menú significa que la energía entrante al horno será, en términos de kW · h o kcal/h, siempre la misma.

El análisis de la composición tanto química como física es de suma importancia en el proceso de estudio, puesto que es la base de partida para elegir los equipos, su diseño, las condiciones de operación y la factibilidad del residuo.

8.1. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LA BIOMASA

En este apartado se lleva a cabo una ligera descripción de las principales propiedades de que debe disponer la biomasa como para que pueda ser tratada como combustible alternativo a los fósiles convencionales.

8.1.1. Propiedades físicas

La viscosidad, densidad y características reológicas condicionan principalmente el modo de alimentación al horno, puesto que lo que se pretende en la combustión es que sea lo más perfecta posible mediante el contacto óptimo entre la materia combustible y el oxígeno. Así, si la materia es seca y sin un tratamiento previo de molienda se puede utilizar un horno de parrilla, si es seca pero con un pretratamiento de molienda y tamizado se puede utilizar un horno de lecho fluidizado, y para fangos o materiales pastosos, ya sean secos o no, un horno rotatorio.

Algunas de las propiedades físicas más importantes que condicionan al residuo son:

- *Densidad aparente*: Se refiere al peso por unidad de volumen. Los combustibles con una alta densidad aparente tienen mayor energía por unidad de volumen, lo que equivale a diseño de equipos más pequeños, alimentación discontinua, almacenes y transporte menores, consiguiendo una disminución de los costes de operación.
- *Contenido de humedad*: Se refiere a la cantidad de agua que presenta la biomasa. Hay que tener presente que hará falta una determinada cantidad de energía, que se detraerá del PCI del combustible para evaporar esta agua. Sin embargo, una vez los gases abandonan la caldera, si la temperatura es superior a 100 ℃, el agua, en forma de vapor, se emite a la atmósfera y el calor empleado en vaporizar la humedad, se pierde. De ahí la importancia de que la biomasa esté razonablemente seca.

Por lo general, la instalación será factible si el contenido de humedad no es superior al 30%. De lo contrario deberá ser tratado para un secado parcial con lo cual habría que hacer un análisis sobre su viabilidad económica.

En resumen, es muy importante tener en cuenta el contenido de humedad o cantidad de agua del residuo puesto que tiene una gran influencia sobre el balance calorífico del proceso. Este punto se analizará más detenidamente en el apartado siguiente.

8.1.2. Propiedades químicas

Conociendo los elementos que componen el residuo es posible calcular el poder calorífico y realizar un primer balance de viabilidad económico y técnico del proyecto. Dependiendo de la composición química se conocerán los gases de chimenea que se formarán, lo cual es imprescindible para tomar las medidas medioambientales pertinentes.

De un primer análisis de la biomasa en general y los residuos agrarios y forestales en particular frente a los combustibles fósiles, se desprende que presentan un alto contenido de carbono y oxígeno y niveles muy bajos de azufre siendo por tanto menos contaminantes. La Tabla 10.53 muestra la composición de algunos residuos agrícolas y forestales.

Una vez que se ha estudiado la composición fisicoquímica del residuo se procede al cálculo de su poder calorífico, que es una propiedad de cada combustible. Se puede utilizar la potencia calorífica superior o inferior, las cuales se definen como el calor desprendido en la combustión completa con oxígeno, estando reactivos y productos a 25 ℃ y 1 bar. Se diferencian una y otra, porque la potencia calorífica inferior del agua se encuentra en estado de vapor a 25 ℃. Por lo tanto, para pasar de una a otra se utiliza la siguiente ecuación:

Tabla 10.53. Análisis elemental de los distintos residuos agrícolas y forestales

Elemento (%) en peso	Orujillo de oliva	Restos vegetales de invernadero	Poda de olivar
Carbono	50,00	42,3	49,50
Oxígeno	34,50	48,5	44,20
Hidrógeno	6,40	5,6	5,90
Nitrógeno	1,20	1,83	0,39
Azufre	0,11	0,27	0,05
Cloro	0,10	0,2	0,04

$$PCS = PCI + m_{H_2O} \cdot h_{vH_2O}$$

En el estudio de factibilidad de la planta no se utiliza la potencia calorífica en base seca, que es como se define el poder calorífico inferior, sino que a efectos prácticos se usa el concepto de potencia calorífica útil que es el calor que se puede generar una vez que se ha evaporado el contenido de agua del combustible. La Tabla 10.54 muestra el PCI útil de diversos combustibles en función de su humedad.

La potencia calorífica se mide en kcal/kg o kJ/kg. La conversión para pasar de uno a otro es la siguiente: 1 kcal = 4,184 kJ, y 1 kJ = 0,24 kcal.

La Figura 10.24 hace referencia al porcentaje de humedad de los eucaliptos y cómo ello afecta a su poder calorífico.

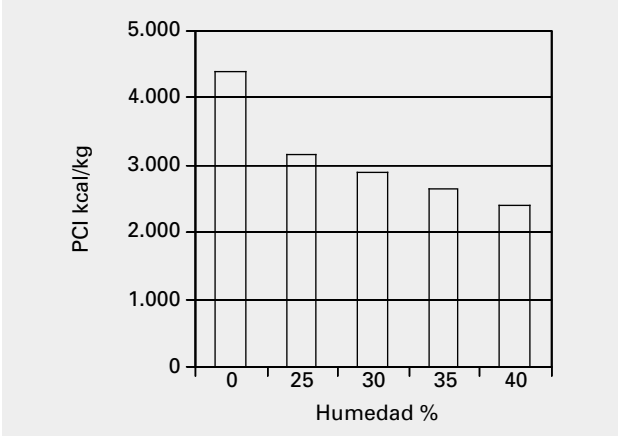


Figura 10.24. PCI frente a % humedad para eucaliptos.

Tabla 10.54. Poderes caloríficos útiles de diversos residuos orgánicos según humedad

Producto	PCI (kJ/kg) a humedad x					
	x	PCI	x	PCI	x	PCI
Leñas y ramas	0	19.353	20	15.006	40	10.659
Serrines y virutas	0	19.069	15	15.842	35	11.537
Orujillo de oliva	0	18.839	15	15.800	35	11.746
Cáscara de almendra	0	18.559	10	16.469	15	15.424
Cortezas (coníferas)	0	19.437	20	15.257	40	11.077
Cortezas (frondosas)	0	18.225	20	14.087	40	9.948
Poda de frutales	0	17.890	20	13.836	40	9.781
Paja de cereales	0	17.138	10	15.173	20	13.209
Vid (sarmientos)	0	17.765	20	13.710	40	9.656
Vid (ramilla de uva)	0	17.263	25	12.331	50	7.399
Vid (orujo de uva)	0	18.894	25	13.543	50	8.193

8.2. CÁLCULO DE LA POTENCIA CALORÍFICA INFERIOR

Para calcular el PCI se pueden utilizar tres ecuaciones, una vez que se conoce la composición elemental del residuo a incinerar:

- *Fórmula de Dulong modificada*. Es útil y muy usada para combustibles sólidos con alto contenido en nitrógeno. Permite calcular el poder calorífico inferior a partir de los porcentajes de cada elemento en base seca:

$$PCI\ (kcal/kg_{base\ seca}) = 7.831 \cdot C_{org} + 35.932 \cdot (H\text{-}O/8) + 2.212 \cdot S - 3.545\ C_{inorg} + 578 \cdot N$$

- *Fórmula de Chang.*

$$PCI = 8.561{,}1 \cdot C + 179{,}7 \cdot H - 63{,}8 \cdot S - 111{,}1 \cdot O - 91{,}1 \cdot Cl - 66{,}9 \cdot N\ (kcal/kg)$$

- *Fórmula de Boie*. Desarrollada para residuos con un alto contenido en celulosa.

$$PCI = 83{,}2 \cdot C + 274{,}3 \cdot H - 25{,}8 \cdot O + 15 \cdot N + 9{,}4 \cdot Cl + 65 \cdot P\ (kcal/kg)$$

Llegado al punto del análisis de la potencia calorífica se decide si el residuo es conveniente para incinerar o no. Un residuo óptimo, desde el punto de vista económico, es aquel que presenta alta cantidad de materia orgánica y baja de agua e inertes.

Por lo tanto, se puede observar que el cálculo de PCI del residuo constituye un factor determinante para determinar si el proceso de incineración a realizar es viable.

8.3. DIAGRAMA DE COMBUSTIÓN

La construcción del diagrama de combustión es aconsejable para el diseño y posterior funcionamiento de una instalación de combustión a partir de una mezcla de combustibles de las que se conoce el análisis elemental. Se trata de un ejercicio aconsejable, al menos en un primer ejemplo, consistente en conocer todas las posibles combustiones del residuo a tratar. Su razón de ser es que permite averiguar de forma rápida y bastante precisa la combustión de la mezcla, porque lo que se pretende alcanzar es una combustión perfecta, es decir, que todo el carbono pase a CO_2 y no a CO (gas combustible y contaminante). La comprobación de la combustión se realiza mediante sensores (analizadores de gases) en los gases de combustión dentro del horno y/o a la salida de la chimenea. Mediante el uso de este diagrama se garantiza una óptima combustión de la mezcla. La Figura 10.25 muestra, de manera esquemática, un diagrama de combustión.

Para su desarrollo se necesita conocer el volumen total de los gases de combustión (ya realizado en un ejemplo anterior del mismo capítulo), con exceso o con defecto de aire, y formación de CO_2 + CO, cuyas ecuaciones pueden ser expresadas del siguiente modo:

$$Vgcombt = Vgcombsecos + \frac{e}{100} Vairet + \frac{VCO}{2} \frac{m^3}{kg}$$

El volumen de O_2 en los gases totales de combustión es igual a:

$$VO_2 = \frac{21}{100} \frac{e}{100} Vairet + \frac{VCO}{2} \frac{m^3}{kg}$$

Volumen de CO_2 en la combustión:

$$VCO_2 = \frac{A\ Vgcombsecos}{100} - VCO \frac{m^3}{kg}$$

Volumen de CO en los gases de combustión:

$$VCO = VCO \frac{m^3}{kg}$$

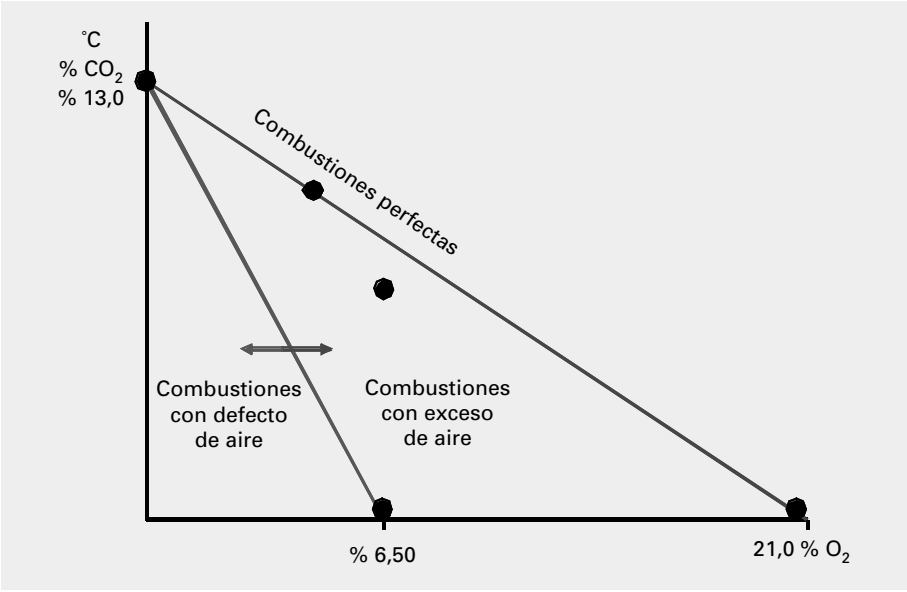


Figura 10.25. Esquema y puntos principales de un diagrama de combustión.

Su porcentaje en volumen será igual a:

$$x = \%O_2 = 100\frac{VO_2}{Vgcombt} =$$

$$= 100\frac{\frac{21}{100}\frac{e}{100}Vairet + \frac{VCO}{2}}{Vgcombt + \frac{e}{100}Vairet + \frac{VCO}{2}}$$

$$x = \%CO_2 = 100\frac{VCO_2}{Vgcombt} =$$

$$= 100\frac{\frac{A}{100}Vgcombsecos - VCO}{Vgcombt + \frac{e}{100}Vairet + \frac{VCO}{2}}$$

$$x = \%CO = 100\frac{VCO}{Vgcombt} =$$

$$= 100\frac{VCO}{Vgcombt + \frac{e}{100}Vairet + \frac{VCO}{2}}$$

Una vez definidas estas ecuaciones se determina la relación existente entre las concentraciones de O_2 y CO_2 eliminando el porcentaje de CO de las anteriores ecuaciones. Por tanto queda:

$$\frac{x}{100} = \frac{\frac{21}{100}\frac{e}{100}Vairet + \frac{VCO}{2}}{Vgcombt + \frac{e}{100}Vairet + \frac{VCO}{2}}$$

$$\frac{y}{100} = \frac{\frac{A}{100}Vgcombsecos - VCO}{Vgcombt + \frac{e}{100}Vairet + \frac{VCO}{2}}$$

$$\frac{100 - x}{100} = \frac{Vgcombsecos - \frac{79}{100}\frac{e}{100}Vairet}{Vgcombsecos + \frac{e}{100}Vairet + \frac{VCO}{2}}$$

Dividiendo ambas ecuaciones se obtiene:

$$\frac{200 - 2x}{200 + y} = \frac{Vgcombsecos - \frac{79}{100}\frac{e}{100}Vairet}{Vgcombsecos + \frac{e}{100}Vairet + \frac{A\ Vgcombsecos}{200}}$$

Y despejando «y»:

$$y = \frac{100A\ Vgcombsecos + 2e\ Vairet - x((200 + A)Vgcombsecos + 2e\ Vairet)}{Vgcombsecos\frac{79e}{100}Vairet}$$

Dicha recta proporciona una familia de rectas con exceso de aire constante.

Igualando se obtiene:

$$\frac{y}{t} = \frac{\frac{A\ Vgcombsecos}{100} - VCO}{VCO}$$

$$\frac{y + t}{t} = \frac{A\ Vgcombsecos}{100\ VCO}$$

Despejando VCO:

$$VCO = \frac{A\ Vgcombsecos}{100(y + t)}$$

De la ecuación del porcentaje de CO, se obtiene:

$$\frac{e\ Vairet}{100} = \frac{100\ VCO}{t} = Vgcombsecos - \frac{VCO}{2}$$

Sustituido en la ecuación del porcentaje de O_2, se obtiene:

$$\frac{x}{100} = \frac{\frac{21}{100}\left(\frac{100\ VCO}{t} - Vgcombsecos - \frac{VCO}{2}\right) + \frac{VCO}{2}}{Vgcombsecos + \frac{100\ VCO}{t} - Vgcombsecos - \frac{VCO}{2} + \frac{VCO}{2}} =$$

$$= \frac{\frac{21}{100}\frac{100\ VCO}{t} - \frac{21\ Vgcombsecos}{100} - \frac{21\ VCO}{200} + \frac{VCO}{2}}{\frac{100\ VCO}{t}}$$

$$\frac{x\ VCO}{t} = \frac{21\ VCO}{t} - \frac{21\ Vgcombsecos}{100} + \frac{79\ VCO}{200}$$

Despejando:

$$\frac{x}{t} = \frac{21}{t} - \frac{21\ Vgcombsecos}{100\frac{A\ Vgcombsecos}{100(y + t)}t} + \frac{79}{200} = \frac{21}{t} - \frac{21(y + t)}{At} + \frac{79}{200}$$

Se multiplica la expresión anterior por 200 At

$$200\ Ax = 21 \cdot 200\ (y + t) + 79\ At$$

Despejando «y» se obtiene:

$$y = A - \left(1 - \frac{79\ A}{21 \cdot 200}\right)t - \frac{A}{21}x \quad (I)$$

Fijado el parámetro t resulta una familia de rectas de porcentaje de CO constante.

Ambas familias de rectas obtenidas constituyen el diagrama de Ostwald, tal y como se representa en la Figura 10.26. La nomenclatura usada es la siguiente:

- e = exceso de aire.
- A = porcentaje de CO_2 en volumen.
- Vgcombt = volumen gases totales de combustión.
- Vgcombsecos = volumen de gases de combustión secos.
- Vairet = volumen de aire teórico.
- VCO = volumen de CO.
- VCO_2 = volumen de CO_2.

Otra forma de ver el diagrama de combustión consiste, como esquematizaba la Figura 10.25, en imaginar una escala de temperaturas (el eje de ordenadas). El punto de máxima temperatura sería el co-

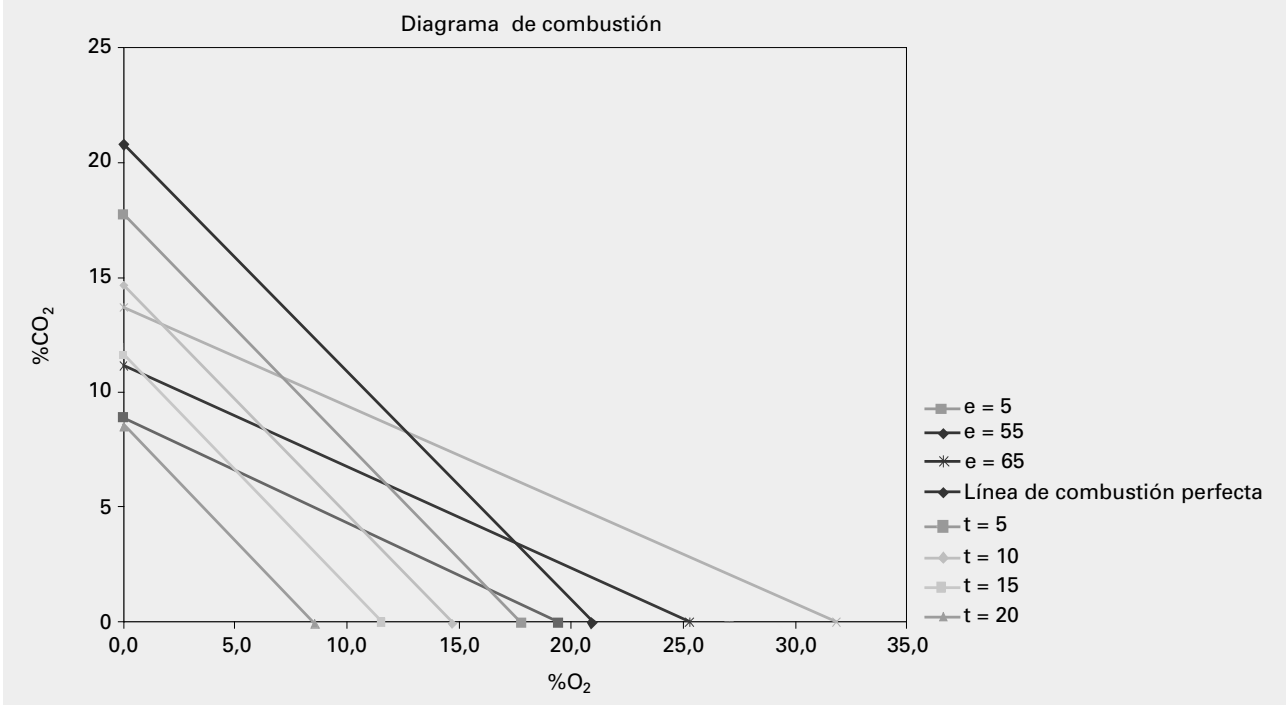


Figura 10.26. Esquema del diagrama de Ostwald para la biomasa.

rrespondiente a la máxima cantidad de CO_2 (que coincide con la combustión estequiométrica), mientras que el origen correspondería a la temperatura ambiente. Se observa que en la medida que aumenta la cantidad de exceso de aire el porcentaje de CO_2 en los humos es menor y la temperatura, lógicamente, también disminuye.

8.3.1. Cálculo de la recta de combustión perfecta

El cálculo de esta recta es de suma importancia puesto que divide la zona de inquemados y combustión perfecta. Se debe considerar que cuanto mayor sea la cantidad de CO generado, los gases de combustión serán más contaminantes. El CO es de los pocos contaminantes que no es posible depurar.

En los procesos industriales es difícil conseguir una combustión completa, o sin la presencia de inquemados. Durante el proceso de combustión se presentan oscilaciones de la temperatura que es preciso corregir de manera constante. Esta corrección suele llevarse a cabo por medio de la regulación de la cantidad de aire. Cuando la masa de comburente varía, la hidrodinámica de la mezcla (aire/gas) se altera y las probabilidades de que aparezcan inquemados, aunque sea de forma instantánea, es muy grande. De hecho esta contingencia ya la prevén los diagramas de combustión, donde la posibilidad de tener inquemados es muy elevada.

A pesar que las cámaras de la mayoría de hornos presentan un tiempo de residencia alto, más que suficiente para la destrucción térmica de todos los compuestos orgánicos (toda clase de hidrocarburos), la presencia del CO es un caso bien particular. Así el primer inquemado, y más común, que aparece en la combustión es el monóxido de carbono. Se trata de un gas venenoso, cuya ecuación de formación, a partir del metano es la siguiente:

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow 2\ H_2O + CO_2 + CO\ (\text{trazas})$$

Indica, suponiendo que la mezcla de combustible-comburente en el quemador sea correcta, que:

- Cuanto más carbono esté presente en el combustible, mayor potencial de formación de CO.
- La producción de CO disminuye con el incremento del exceso de aire.
- La producción de CO aumenta con el incremento de la temperatura.

Este ultimo parámetro es el más importante y el que explica el por qué aparece CO en los gases de combustión en los hornos que trabajan a alta temperatura. La presencia de CO en el interior de la cámara de combustión suele ser importante, no obstante en la chimenea, con independencia del exceso de aire usado, suele aparecer poco CO; la explicación estriba en la ecuación que define la oxidación del CO a dióxido de carbono:

$$CO + \tfrac{1}{2}\ O_2 \rightarrow CO_2$$

La reacción se desplaza hacia la derecha a medida que disminuye la temperatura. Ahora bien, si tan mal se lleva a cabo la mezcla de gas y aire en el quemador (o la parrilla) y tanto CO se genera, con independencia de la cantidad de oxígeno presente, se emitirá CO a la atmósfera. Vale la pena hacer un par de reflexiones sobre la eliminación del CO. Es frecuente pensar que el aumento súbito del comburente, gran exceso de aire, arregla la situación. La experiencia demuestra que ello no es así (a veces se incrementa el CO), lo único que hace el gran exceso de aire es aumentar el consumo de combustible. Si la adición de aire se lleva a cabo después del horno: dilución (práctica prohibida o inútil para muchas aplicaciones) el efecto es el enfriamiento de la corriente y, por tanto, la inversión de la tendencia de la reacción. La temperatura de transición se halla alrededor de los 500 ℃.

Tan importante y común es la presencia de CO que su valor se usa para definir el concepto de eficacia de la combustión (CE) como el resultado del cociente:

$$CE = 100 \cdot \frac{CO_2}{CO_2 + CO}$$

Desde el punto de vista teórico, en la combustión perfecta todo el carbono se convierte en CO_2 por lo que el porcentaje de CO es igual a cero, con lo que la recta I, queda:

$$y = A - \frac{A}{21}x$$

por tanto para los puntos x = 0 e y = 0, se obtiene:

- x = 0, y = A; no hay oxígeno en la combustión, así la combustión es estequiométrica.
- y = 0,x = 21; lo que significa que el exceso de aire es muy grande siendo despreciable el resto de gases de combustión.

Con ambas puntos se puede trazar la recta.

8.3.1.1. Cálculo de la familia de rectas de porcentaje de CO constante

Son de la forma de la recta I. Por tanto, para determinar dichas rectas se obtiene un punto de intersección para y = 0, y se traza una paralela a la recta de combustión perfecta.

El valor máximo de porcentaje de CO que se puede obtener para una combustión se determina a partir de la ecuación anterior, para x = 0 e y = 0, siendo:

$$t\ máx = \frac{A}{1 - \frac{79\ A}{21x200}}$$

8.3.2. Cálculo de la familia de rectas de defecto o exceso de aire constante

A partir de la ecuación II se obtiene la denominada línea de aire, a partir de e = 0:

$$y = A - \left(2 + \frac{A}{100}\right)x$$

Para x = 0, y = A:

$$y = 0\ x = \frac{A}{2 + \frac{A}{100}}$$

Para el trazado de familia de rectas de exceso o defecto de aire constante, como tienen igual forma, basta con obtener el punto de intersección con la línea de aire y trazar una paralela a la anterior.

8.3.3. Ejemplo del diagrama de combustión de una mezcla de biomasas

El diagrama de la Figura 10.26 corresponde a una mezcla de biomasa de 40% de pino y humedad del 30%, y restos de invernadero (60%) con humedad del 70%.

En el diagrama el eje de ordenadas representa la cantidad de CO_2. La línea de combustión perfecta corta al eje de ordenadas, siendo su valor la cantidad máxima de CO_2, no existe oxígeno libre y también la temperatura alcanzada es máxima. La recta de combustión perfecta corta al eje de coordenadas en un punto que significa una combustión con dilución de aire infinito. Con lo cual esta recta corresponde a las combustiones completas.

Toda combustión por debajo de esta línea da combustiones con inquemados.

La línea de aire divide el diagrama en dos formas de combustión con exceso de aire (incineración) y con defecto de aire (gasificación).

8.4. BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA

La Figura 10.27 muestra el balance de materia para la fase sólida y gaseosa.

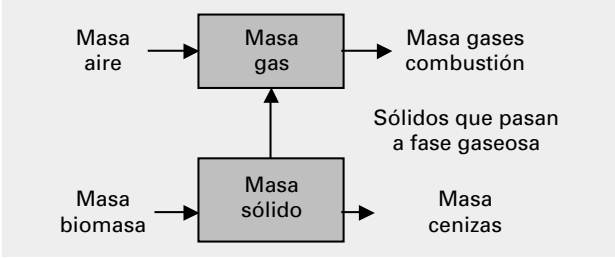


Figura 10. 27. Esquema del balance de masa de la combustión de la biomasa.

Balance fase sólida:

Es preciso determinar la masa de cenizas para completar el balance de masas.

Balance fase gaseosa

Masa de aire + masa de sólidos que pasan a fase gaseosa (combustibles) = masa de gases de combustión.

Para el balance de energía hay que tener en cuenta los distintos calores que se producen en el horno:

Calor de combustión

Corresponde al que desarrolla el combustible cuando alcanza la oxidación total.

$$Q_{comb} = m_{biomasa} \cdot PCI$$

La energía generada se transmite a los gases que se emiten a cierta temperatura.

$$Q_{gas\ comb} = m_{gas\ comb} \cdot cp_{gas\ comb} \cdot (T_g - T_a)$$

Calor transmitido por radiación

$$Q_{rad} = \sigma A(T_g^4 - T_p^4)$$

Calor transmitido por convección

$$Q_{conv} = \alpha A(T_g - T_p)$$

El balance de energía es de la forma:

$$Q_{comb} = Q_{gas\ comb} + Q_{rad} + Q_{conv}$$

A partir del balance de materia y energía se determina el exceso de oxígeno necesario para la combustión comprobando que la temperatura de llama esté dentro de la normativa vigente.

En el DVD adjunto, en el punto 12, se muestra un ejercicio interactivo que permite calcular todos los parámetros de combustión de una biomasa o mezcla de ellas.

8.4.1. La temperatura de llama

Naturalmente existe una relación entre el PCI de un combustible y la temperatura teórica de la llama. Sin embargo, a efectos prácticos y de conducción del horno, el combustible es un parámetro fijo mientras que la masa de aire es variable. Por ello, parece más lógico hacer hincapié en esta última relación y su efecto sobre la temperatura real, como muestra la Figura 10.28.

La temperatura de llama es definida como la temperatura de los productos de combustión para una reacción adiabática donde los reactivos entran a 25 ℃ y todo el calor generado en la reacción se invierte en calentar los productos de combustión.

Una instalación de conversión energética: combustión, gasificación, etc., se diseña según la masa de combustible que se transforma en gases y éstos, a una determinada temperatura, ocupan un volumen. El proyectista, para calcular el volumen interno del horno, la cámara de postcombustión o el lavado de gases ha de conocer, *a priori,* el caudal teórico de gases, así como sus fluctuaciones, tal y como indica la Figura 10.29.

La buena o mala combustión es debido a las fluctuaciones de la temperatura de llama que debe ser regulada mediante la aportación de más o menos aire; también se deben al tipo de residuo y cantidad que el sistema elegido puede soportar, así como a la calidad del sistema de alimentación.

Para medir la eficiencia de la combustión se mide en chimenea el porcentaje de CO recogido. Para solucionar este problema se proporciona un exceso de aire en un proceso de combustión disminuyendo la producción de CO_2 y en mayor grado de CO, lo cual desde el punto de vista ambiental es favorable, pero también se observa que disminuye la temperatura de llama lo cual implica que la eficiencia del proceso de combustión se reduce.

Hay que ver la instalación en su conjunto como un intercambiador de calor en cadena. El combustible cede su calor a los gases de combustión (si hay inquemados, como el CO, significa que parte del calor se pierde) que, a su vez transmiten el calor a la caldera para la producción del vapor. Habida cuenta que la relación de masa de combustible con respecto a la del aire puede oscilar de 1 a 5-8, se comprende que si el exceso de aire aumenta, se debe calentar más aire y la eficiencia de la caldera será menor puesto que su rendimiento es una función de la temperatura.

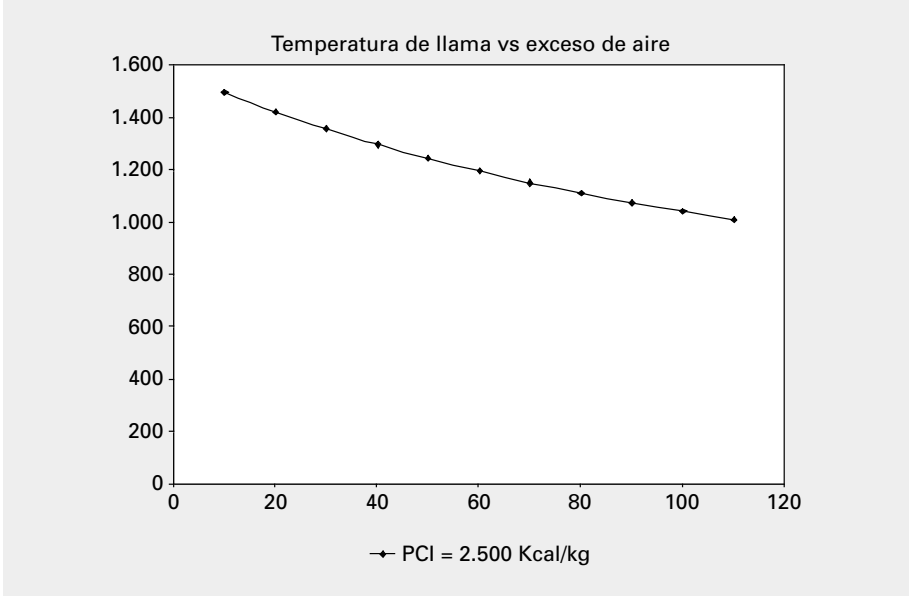


Figura 10.28. Temperatura teórica de llama vs. exceso de aire.

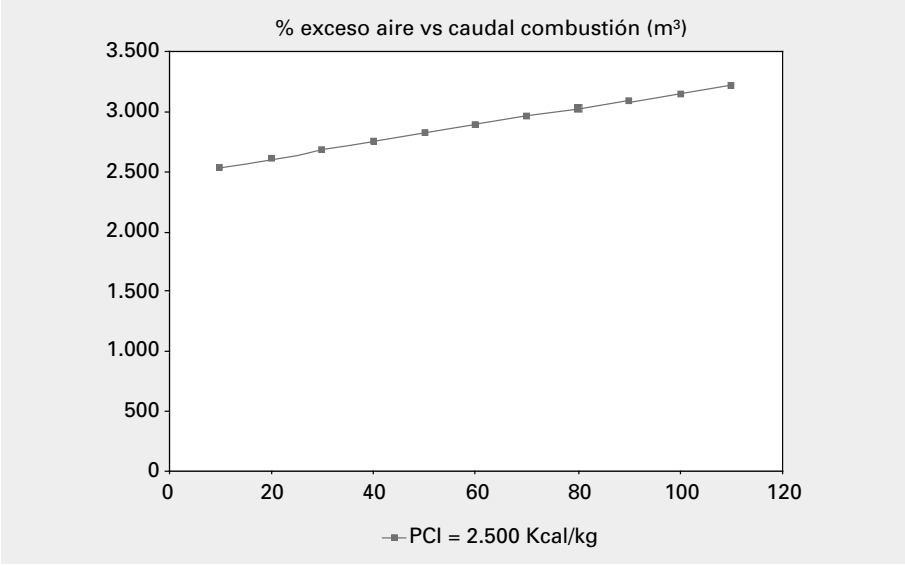


Figura 10.29. % de exceso de aire vs caudal de combustión.

8.5. PARÁMETROS DEL CÁLCULO DE UN INCINERADOR

Las partes o zonas que configuran un incinerador son:

1. Zona de descarga y almacenamiento. Hay que prever un almacenamiento mínimo para prevenir fallos en el suministro, y un sistema de almacenamiento que prevenga el combustible contra los elementos naturales (lluvia). Además, el sistema de almacenamiento debe prever la necesidad de establecer el "menú" en el caso de que haya de tratar con varios combustibles a la vez.
2. Zona de alimentación del horno. Constituida normalmente por una tolva y un mecanismo de alimentación. Para el buen funcionamiento de la instalación es fundamental que la alimentación sea tan regular y constante como sea posible. Matemáticamente sería lo mismo introducir un lote de 1.000 kg, de golpe en un horno que 250 kg cada 15 minutos o 16,6 kg al minuto. Pero desde el punto de vista técnico y físico esta última alternativa debería ser la única válida.
3. Horno y su cámara de combustión para garantizar una completa destrucción de los contaminantes. Desde la óptica ambiental, el horno es donde se forman las llamas y éstas son sinónimo de generación de contaminantes. Es un «peaje» que se paga para la conversión de sólidos y líquidos a gas.
4. Cámara de oxidación, donde se oxidan la mayoría de los inquemados que proceden del horno (en esta zona desaparecen las llamas), y cámara de postcombustión, donde por craqueo térmico se destruyen los hidrocarburos de cadena larga que había en el combustible, o se han generado a raíz de la formación y desarrollo de las llamas.
5. Zona de recogida y extracción de escorias y cenizas. Las escorias se reciben en la parrilla del horno, mientras que las cenizas se recogen en la caldera y, sobre todo, en el ciclón y/o filtro de mangas.
6. Zona de recuperación de energía. Es decir, la caldera. En instalaciones de pequeño tamaño se instala un intercambiador de radiación donde los gases de combustión ceden su calor latente al aire, que se emplea como aire de combustión o para otros usos, como secado.
7. Zona de limpieza de gases.
8. Zona de almacenamiento de escorias y cenizas.
9. Zona de evacuación de gases depurados. Donde, además suele haber la estación de medida y control de emisión de gases.

El horno no solamente constituye la combustión de la mezcla sino también el avance de la biomasa y su aireación en la combustión para conseguir una buena mezcla comburente y combustible. Para la conversión energética de la biomasa se pueden distinguir tres tipos de hornos:

- Horno de parrilla: La biomasa no necesita ningún tipo de pretratamiento, seguramente por

ello es la más usada. La inyección inferior del aire es precisa para refrigerar las parrillas (sin embargo ello retrasa las etapas de combustión). La posible fusión de las escorias también es un factor limitante. En atmósferas reductoras (frecuentes en la lámina de contacto entre combustible y parrilla) la deformación se produce a menor temperatura. Los inquemados que se filtran por las parrillas pueden generar problemas e incendios.

- Horno rotatorio: La biomasa no necesita ningún tipo de tratamiento. El horno rotatorio también es utilizado para fangos de depuradoras. Puede trabajar con un mínimo exceso de aire, lo que permite una elevada temperatura. Las escorias tiene una garantía de estar mejor quemadas. Admite todo tipo de combustible. No hay partes metálicas en el interior del horno, con lo que la temperatura no es un factor limitante. Permite regular el tiempo de permanencia de sólidos.
- Horno de lecho fluidizado: La biomasa necesita un pretratamiento de triturado y tamizado. Garantiza un contacto óptimo entre comburente y combustible. Este sistema permite una mayor transferencia de calor desde las partículas de refractario que constituyen el lecho hacia la carga que se mantiene en constante agitación, gracias al caudal de fluidificación. Es posible usar mezclas heterogéneas de combustibles (fangos). Permite una minimización de las emisiones de SO_2 y HCl por adición de reactivos en el propio lecho (carbonatos). Reducción de las cantidades de NOx al trabajar a menores niveles térmicos y excesos de aire más reducidos. Aumento del tiempo de residencia.

Para el cálculo del incinerador hay que tener en cuenta el tipo de combustible a utilizar, tamaño de entrada, variabilidad a lo largo de las estaciones del año, volumen del residuo, variación del PCI, humedad de entrada del residuo por si requiere un pretratamiento antes de la entrada del horno, etc.

Estos parámetros determinan el dimensionado de la cámara de combustión, el tipo de tratamiento de limpieza de gases de combustión, posibles centros de almacenaje y, en definitiva, la viabilidad económica de la planta.

8.5.1. Datos básicos para el diseño

Antes de poner un ejemplo de cálculo se ha de señalar que un horno se diseña para trabajar con una determinada carga térmica (kcal/$m^3 \cdot h$). Con este objetivo se deben cumplir dos premisas:

- PCI del residuo alimentado debe ser constante.
- Alimentación constante del horno.

La combinación de ambos parámetros («menú») debe jugar con estas dos premisas. Para que el PCI deba ser constante se puede aumentar la carga y viceversa.

El horno de parrilla para el cual se ha realizado el presente ejemplo de cálculo se emplea normalmente para la incineración en masa. El principio de funcionamiento se basa en el avance del combustible mediante el arrastre de unos elementos provistos de movimiento relativo entre sí. Estos elementos sostienen además el combustible, insuflándose entre los mismos el aire necesario para el inicio de la combustión. Según van avanzando los residuos, se va completando la combustión de los mismos, de forma que a la salida (escorias) el contenido de inquemados es bajo. A lo largo de la parrilla tienen lugar los siguientes procesos:

- *Secado:* (Temperatura entre 100-250 ℃). Se produce el secado de los residuos debido a la acción del aire de combustión (calentado o no en función de humedad de los residuos).
- *Desgasificación:* (250-600 ℃): Empieza la combustión por radiación del calor procedente del refractario y de la masa de gases en combustión. Además, en la combustión se desprenden diferentes tipos de gases procedentes de la descomposición térmica y carbonización de los residuos.
- *Gasificación y combustión del carbono sólido:* (600-800 ℃): Combustión generalizada en toda la masa del combustible. Descomposición térmica de los gases producidos y posterior oxidación.
- *Agotamiento de escorias:* (800-1.200 ℃): Combustión de los productos de carbonización y formación de escorias. Finalmente la escoria agotada se enfría parcialmente con el aire insuflado en la zona final de la parrilla.

El principal inconveniente de esta tecnología radica en que conceptualmente se parte de un diseño cuyo objetivo principal es la eliminación del residuo, más que la recuperación energética con un alto rendimiento. Los inquemados que aparecen en las escorias alcanzan un valor aproximado del 4%. La

temperatura en el hogar es elevada, del orden de 1.100 ℃, lo que favorece la formación de óxidos de nitrógeno. Por otra parte, la presencia de partes mecánicas móviles encarece los costes de mantenimiento. Como ventajas, cabe citar, además de la fiabilidad y seguridad del sistema cuyo funcionamiento está muy contrastado, la flexibilidad operativa al poder realizar paradas rápidas para mantenimiento debido a que la cantidad de combustible en el horno es pequeña.

Existen varios tipos de hornos de incineración de parrillas:

- Parrillas fijas.
- Parrillas móviles.
- Con diferentes tipos de parrillas y movimiento.

Los tipos de parrilla más utilizados son los siguientes:

- Barras longitudinales.
- Barras transversales.
- Rodillos: Están formadas por una serie de cinco o seis rodillos de ejes horizontales, cuyo plano está inclinado respecto al horizontal entre 20 y 25 grados. El diámetro de los rodillos puede llegar a 1,5 m.
- Parrilla vibrante.

En la actualidad se dispone en el mercado de equipos que combinan una serie de mejoras en el diseño del horno, del sistema de alimentación de combustible y del tipo de parrilla, con lo que se pueden obtener algunas de las ventajas del lecho fluidizado. Una de estas tecnologías es la parrilla vibrante refrigerada por agua que tiene como ventaja la reducción del problema de la escorificación al mantenerse la superficie de la parrilla refrigerada.

8.5.2. Ejemplo dimensionado de un horno de parrilla de forma rápida

En primer lugar se justifica la utilización de un horno de parrilla frente al de lecho fluidizado en que los residuos no tienen que recibir un tratamiento inicial para su posterior combustión. Desde la óptica de la física esta aseveración es incorrecta. Todo combustible sólido o líquido precisa de un cierto grado de adecuación, principalmente por lo que hace referencia al tamaño de partícula. Lo que acontece es que un sistema de horno, el de lecho fluidizado, lo exige, mientras que los de parrilla pueden evitarlo, pero lo «pagan» en mantenimiento e inquemados.

Se toman como válidos los siguientes parámetros de diseño (estos valores son específicos de cada fabricante):

- Carga térmica de la parrilla: entre 500.000-900.000 kcal/h · m^2.
- Carga mecánica de la parrilla: 250-450 kg/h · m^2.
- Carga térmica de la cámara de combustión: 10.000-100.000 kcal/h · m^3.

El diseño del horno depende del PCI de la mezcla que vaya a valorizarse, de su capacidad mecánica y de la forma física del combustible. Por la ley vigente es preciso dimensionar la cámara de potcombustión por la necesidad del tiempo de residencia de los gases de combustión con una temperatura determinada, también dictaminada por ley. Teniendo en cuenta que no se debe sobrepasar la carga térmica de la cámara de combustión, porque quedaría disminuida la capacidad mecánica de la instalación.

En el caso del ejemplo propuesto: Alimentación 5 t/h, con medio para cada combustible de PCI 2.500 kcal/kg y 1.200 kcal/kg.

8.5.2.1. Carga térmica de la parrilla

Para cada PCI:

$$\frac{5.000\ \text{kcal/h} \cdot 1.200\ \text{kcal/kg}}{500.000\ \text{kcal/hm}^2} = 18\ \text{m}^2$$

$$\frac{5.000\ \text{kg/h} \cdot 2.500\ \text{kcal/kg}}{900.000\ \text{kcal/hm}^2} = 13{,}89\ \text{m}^2$$

Por lo tanto se toma el valor más desfavorable, 16 m^2, para manejar la carga térmica.

Carga mecánica:

$$\frac{5.000\ \text{kg/h}}{250\ \text{kg/hm}^2} = 20\ \text{m}^2$$

$$\frac{5.000\ \text{kg/h}}{450\ \text{kg/hm}^2} = 11{,}11\ \text{m}^2$$

De los resultados se colige que el dimensionado de 16 m^2 es válido.

8.5.2.2. Volumen de la cámara de combustión

Para cada combustible:

$$\frac{5.000\ \text{kg/h} \cdot 1.200\ \text{kcal/kg}}{80.000\ \text{kcal/hm}^3} = 75\ \text{m}^3$$

$$\frac{5.000 \text{ kg/h} \cdot 2.500 \text{ kcal/kg}}{100.000 \text{ kcal/hm}^3} = 125 \text{ m}^3$$

En este caso es aconsejable elegir el valor de 125 m^3, para que no quede limitada la capacidad para PCI más altos.

Cuando se ha determinado el volumen de la cámara de combustión hay que llevar a cabo unas relaciones previas entre superficie y altura. De hecho, la dimensión de anchura por la altura elegida determina la sección útil de paso de los gases. Si es muy pequeña, la velocidad es elevada y con ella el arrastre de partículas. En principio, la velocidad en las cámaras de hornos de parrillas y rotatorios no debería exceder de 2 m/s. Para una cámara de biomasa, como la propuesta en el ejemplo, la altura de la cámara de combustión suele ser alrededor de 2,5 m, el horno se aproxima a un paralelepípedo, con lo cual, el volumen es de 125 m^3 y la altura es de 2,5 m,

Con ello se redimensiona la superficie:
S = 125/2,5 = 50 m^2; a partir de este punto se va probando qué superficie es más ventajosa. Por ejemplo: 5 m de ancho por 10 m de largo o 25 m de largo por 2 m de ancho. En este apartado no sólo juega el parámetro de la velocidad antes comentado, sino aspectos económicos. Así, si se determina que dentro de ciertas dimensiones la velocidad máxima de los gases es inferior a la recomendada, la relación volumen/área supone una mayor masa de refractarios y aislantes, es decir una inversión más elevada. También es muy importante la optimización de la superficie para establecer un buen contacto combustible y comburente.

Por lo tanto las dimensiones del horno serán $510 \cdot 5 \cdot 2.5$ m.

Para el cálculo del horno se deben tener en cuenta, además estos dos valores, los siguientes parámetros:

- *Temperatura, en particular en la cámara de postcombustión:* El factor más importante para la destrucción del residuo. Está sujeto a normativa.
- *Tiempo de residencia:* Se debe distinguir el tiempo de residencia de los sólidos en parrilla (para reducir la cantidad de inquemados, por tanto escorias) y el tiempo de residencia de los gases de combustión en cámara de postcombustión a la temperatura prefijada (es muy importante que, a la vez, se cumpla este parámetro sujeto a normativa).
- *Turbulencia:* Es el grado de movimientos que tienen los sólidos en el proceso. Se utiliza para reducir los anteriores parámetros y así los costes de operación. Por ejemplo, en el caso de los hornos rotatorios, ello debe interpretarse como el diseño interno de las paredes del horno para optimizar el volteo y avance de la carga.
- *Presión:* Se trabaja a depresión, para reducir posibles fugas.
- *Suministro de aire:* Operación para garantizar una combustión completa. Al margen de los comentarios vertidos sobre la cantidad, es importante también hablar de la temperatura de entrada del aire primario. Cuanto mayor sea aquélla, mejor calidad de mezcla y rendimiento de la combustión (sin embargo, ello supone un diseño de los tubos de entrada de mayor tamaño).
- *Materiales de construcción:* Materiales que resistan las altas temperaturas y bajas presiones. En el caso de los hornos de parrillas, éstas deben ser metálicas con lo que se presenta un dilema: la temperatura no puede ser muy alta (el aire primario se encarga de refrigerarlas; en contrapartida, al reducir la temperatura, la radiación térmica también se reduce y en menor grado, ya que depende de la cuarta potencia de la temperatura, y el rendimiento de la combustión disminuye).
- *Otros:* Acorde con el resto de las instalaciones para que la operativa sea óptima.

8.6. VIABILIDAD ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE INCINERACIÓN DE BIOMASA

Para llevar a cabo la viabilidad económica, de debe de tener en cuenta:

- Tipo de biomasa.
- Cantidad disponible anualmente.
- Coste unitario.
- Coste total anual.
- Humedad del residuo.
- Energía disponible anualmente.

El coste más importante, y es lo que grava a los costes de explotación, es la logística de recogida y el transporte del residuo.

Se considera una primera aproximación de lo que puede representar la inversión de una planta incine-

radora según la capacidad del tratamiento de la misma. Para ello se plantea el siguiente ejemplo:

La planta consta de dos líneas idénticas, con horno de parrilla y régimen previsto de funcionamiento 8.000 h/año, quemando RSU.

El ratio de inversión para una capacidad de 80.000 t/año es de 300 €/t, pero existe una importante disminución del coste de la planta por incremento del factor escala. Por lo tanto, la inversión inicial para las características de la planta será de 24.000.000 €.

Los costes de operación para la planta se estima en 24 €/t. Este coste está compuesto por los siguientes apartados: *personal* (en sus diferentes categorías), *mantenimiento*, tratamiento de escorias y cenizas, *aditivos* y otros (suministro de energía eléctrica, de agua, seguros, etc.):

$$\text{Coste de operación} = 800.000 \cdot \frac{\text{t}}{\text{año}} \cdot 24 \cdot \frac{€}{\text{año}} = 1.920.000\ €/\text{año}$$

Para poder calcular el beneficio se toma como referencia la normativa del Ministerio de Industria y Comercio de España en donde explican cómo calcular la tarifa eléctrica para este tipo de instalaciones (Ley 10/1998, Ley 16/2002 y las tarifas vigentes para este tipo de explotaciones especiales del 2005).

En el caso de conversión energética de biomasa con aprovechamiento energético, en comparación con otras formas de eliminación o valorización, se cuenta con unos ingresos adicionales por dicho concepto que contribuyen de forma muy significativa al equilibrio económico de la actividad.

Para un residuo de 2.500 kcal/kg se obtiene:

$$\text{kWh/kg RSU (teóricos)} = \frac{2.500\ \text{kcal/kg RSU}}{860\ \text{kcal/kW}} = 2,91\ \text{kWh/kg biomasa}$$

Para calcular la potencia de las turbinas se estima que su rendimiento ronda en torno al 20% (Para este cálculo se estima un rendimiento del 80% de la caldera). A partir de este valor: kWh/kg de RSU (reales) = 2,91 · 0,2 = 0,582 kWh/kg biomasa. Potencia cedida a la turbina = 5.000 kg biomasa (dato · 0,582 kWh/kg RSU = 2.910 kWh/unidad, por lo tanto para las dos turbinas será igual a la potencia cedida total 2.910 kWh/unidad · 2 unidades = 5.820 kWh.

Una vez que se determina la potencia de las turbinas, se puede calcular la energía que se genera de la cual una parte se autoconsume y los excedentes, mayoritarios, se exportan a la red pública. Las cifras resultantes son las siguientes:

- Consumo de electricidad = 84,5 kWh/t biomasa.
- Venta de electricidad = 507,2 kWh/t biomasa.

Luego lo que se obtiene al año será:

- Consumo de electricidad = 84,5 kWh/t biomasa · 80.000 t/año = 6.760 MWh/año.
- Venta de electricidad = 507.24 kWh/t RSU · 80.000 t/año = 40.579 MWh/año.

La conexión de energía eléctrica a la red para la venta de los excedentes se regula anualmente por el Ministerio de Industria, Comercio y Turismo español y en 1998 ha sido regulada por el Real Decreto 2818/1998 de 23 de diciembre, publicada en el BOE del 30 de diciembre, donde en el capítulo IV, artículos 26 y 29 de dicho Real Decreto, se puede calcular el precio por la energía entregada.

En el caso del ejemplo considerado al ser la potencia entregada de 5.820 kW, según normativa vigente, se debe aplicar la siguiente ecuación:

$$R = Pm + Pr \cdot f(ER), \text{ siendo}$$

- R = retribución en €/kW.
- Pm = Precio del mercado, va variando cada año recogido del siguiente BOE núm, 315, viernes 31 de diciembre 2004, ANEXO IV, el cual establece las primas de aquellas actividades que producen electricidad en régimen especial. También tomado de BOE número 315 tarifas eléctricas, su valor es de 0,045444 €/kWh.
- Pr = prima, en este caso su valor es 0,018442 €/kWh, puesto que la instalación tiene una potencia menor de 10 MW.
- ER = complemento por energía reactiva, que será aplicado a la suma de PM y Pr. Será considerado con carácter general en la normativa sobre tarifas, con la diferencia de que si el factor de potencia de la energía cedida a la empresa distribuidora fuere superior a 0,9 el complemento será un abono para el productor, y si fuere inferior, un descuento. Se considera un valor de coste de 0,95, a lo cual corresponde una prima de 0,000010 €/kvvarh.

Se está en condiciones de calcular la retribución:

$$R = (0,0455444 + 0,018442) + 0,000010 \cdot (0,0455444 + 0,018442) = 0,06\ €/\text{kWh}$$

Luego la venta de electricidad, aceptando un mismo precio, es la siguiente:

- Consumo interno de electricidad = 84,5 kWh/t biomasa · 80.000t/año · 0,06 €/kWh = 405.600 €/año.
- Venta de electricidad = 507.24 kW/t · 80.000 t/año · 0,06 €/kWh = 4.057.920 €/año.

Si el consumo interno supone un gasto en la explotación de 1.920.000 €/año, la instalación obtiene un superávit de: 4.0579.200 – 1.920.000 = 2.137.920 €/año.

Así pues la amortización de la planta se puede estimar en:

Amortización = 24.000.000/2.137.920 = 11,2 años, o sea aproximadamente 11 años, lo cual es, financieramente, interesante.

Para mejorar las condiciones del aprovechamiento de este tipo de energías se deben tomar una serie de medidas:

- Subvencionar por parte de los gobiernos las primas a las energías renovables y la producción del kWh de una forma más adecuada.
- Seguridad en el suministro de la biomasa.
- Precio de la biomasa bajo y con variaciones controladas a lo largo del año.
- Seguridad del precio del kWh en un plazo mínimo de 10 años.
- Tecnología probada y posibilidad de amortización.

Para asegurar la seguridad de suministro de biomasa es necesario realizar contratos a largo plazo a los productores y el fomento de cultivos energéticos.

Bibliografía

Agencia Danesa del Medioambiente. http://www.mst.dk/homepage.

BOYLE, G. *Renewable energy, power for a sustainable future*. Oxford University Press. London. UK. (2004).

CAMPS, M. *Los biocombustibles*. Mundiprensa. Madrid. España. (2002).

CARRASCO, J. Aspectos medioambientales de la producción y uso de la biomasa como recursos energético. *Encuentro Medio Ambiental Almeriense*, España. (1998).

CESEFOR. Aprovechamiento forestal para biomasa en la provincia de Soria, *I Jornada sobre Bioenergía*, 2004.

DE BRITO. *Energy from waste: Case study of Brazil*. Science Publishers Inc. UK. (2002).

DE JUANA, J. *et al. Energías renovables para el desarrollo*. Internacional Thomson Editores, España. (2003).

Departamento de Ingeniería Química y Tecnologías del Medio Ambiente de la U. de Zaragoza. 2004. http://wzar.unizar.es/acad/fac/cps/iq/unizar.html.

ELIAS, X, JURADO, L. Empleo de biocarburantes a partir de biomasa. *Revista Tecnoambiente*. Diciembre, 2006.

ELIAS, X. *Reciclaje de residuos industriales*. Ed. Díaz de Santos. Madrid. (2000).

ELIAS, X. *Tratamiento y valorización energética de residuos*. Ed. Díaz de Santos. Madrid. (2005).

Energy Information Administration. *International Energy Annual* 2002. http://eia.doe.gov

European Environment Agency. 2006. *How much bioenergy can Europe produce without harming the environment*. Editorial EEA (Copenhage).

FARREL, A. *et al*. Ethanol can contribute to energy and environmental goals. *Science*, volume 311. (2006).

FIELD, C. B., BEHRENFELD, M. J., RANDERSON, J. T., FALKOWSKI, P.G. Primary production of the biosphere: Integrating terrestrial and oceanic components. *Science* 281: 237-240. (1998).

GÓMEZ -ACEBO, T. *Mezclas reactivas y combustión*, tema 10, Tecnun, 2004.

GROVER, V., GROVER, V. y HOGLAND, W. *Recovering energy from waste*. Science Publishers Inc. USA. (2002). http://www.energidalen.se/

IDAE. 1996. *Manuales de energías renovables*. Energía de la Biomasa. Ministerio de Industria.

Institut Català d'Energia. *Revista Eficiència Energètica*, n.º 163, Junio 2003. Barcelona, España. 2003.

JARABO, F. *Valorización energética de residuos*, (2003).

KOCH, M. Comunicación personal. Consultora Planung + Umwelt. Stuttgart, Alemania. (2005).

LLAURÓ FÁBREGAS, X. *Estudio de la aplicación de sistemas basados en el conocimiento a la operación de una planta de tratamiento de residuos sólidos urbanos por valorización energética*, 2003.

NIESSEN, W, R. *Combustion and incineration processes. Aplications in environmental engineering*, Marcel Dekker, Inc, New York, 1995.

NOGUÉS , F. *et al*. «Ciclo energías renovables. *Jornadas de Biomasa. Generalidades*, Fundación CIRCE 2002.

NORBERTO, C. Metodologías para el Análisis Costo-Beneficio de usos del Suelo y fijación de carbono en sistemas forestales para el mecanismo de desarrollo limpio. *Revista SAGPyA Forestal*, n.º 25. Secretaria de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos. Argentina. (2002).

ONSITE SYCOM Energy. Cost analysis of NO_x control Alternatives for Stationary Gas Turbines. Environmental Programs. U.S. Department of Energy. (1999).

POSLUSZNY, J. A. *Energía de la Biomasa*. Tecnologías para emprendimientos de mediana escala.

SCHINGNITZ, M. Gasification – An oportunity to design environmentally compatible process in the chemical and pulp & paper industry. *Chemical Engineering & Technology Journal*. Volumen 26. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. Alemania. (2003).

System for the Analysis of Global Energy Markets (2004). World Energy Consumption and Carbon Dioxide Emissions, 1990–2025. http://www.infoplease.com. www.consagro.com/articulos2.htm, www.textoscientíficos.com/energía/combustible/estudios-calculos

ZANZI, R. y BJÖRNBOM , E. *Biomasa torrada como substituto de la madera*.

Métodos de valorización y tratamiento de residuos municipales

11

Xavier Elias

ÍNDICE

1. Introducción 787
1.1. Modelos de gestión de los RSU 788
1.2. Recogida selectiva y minimización 790
1.3. Otros conceptos relativos a la gestión de los RSU 792
1.4. Problemática asociada a los compuestos tóxicos 795
1.5. La ley de residuos urbanos. Ley 10/1998 798
1.6. Ley de envases y residuos de envases. Ley 11/1997 799
1.7. Principales normas relativas a los RSU 802
2. Composición y evolución de los RSU 803
2.1. El origen de los residuos urbanos 803
2.2 producción de RSU por comunidades 807
2.3 la naturaleza de los componentes de los RSU 807
2.4 evolución en la composición de los RSU 813
2.5 la gestión de los RSU en españa 814
2.6 la gestión de los RSU en europa 815
3. Residuos tóxicos en los RSU 819
3.1. Definición de residuos peligrosos (RPU) en los RSU 819
3.2. Caracterización de residuos peligrosos en los RSU 822
3.3. Problemas ocasionados por los residuos peligrosos en los RSU 823
3.4. Consejos prácticos para la gestión de los RSU tóxicos 825
4. El tratamiento de RSU en España 826
4.1. El tratamiento de los RSU en España como miembro de la UE 827
4.2. Tipología de los integrantes de los RSU 828
4.3. La recogida selectiva 832
4.4. Los puntos verdes o puntos limpios 835
4.5. Los ecoparcs 837
5. Sistemas de tratamiento térmicos de los RSU. 839
5.1. El RSU como combustible 842
5.2. La esencia de la destrucción térmica 845
5.3. Aspectos ambientales de la incineración de RSU 847
5.4. El tiempo de residencia y la temperatura 847
5.5. El tratamiento de los gases 848
5.6. La incineración de los RSU 848
5.7. Coincineración 860
5.8. Pirólisis 860
5.9. Gasificación 861
6.. Sistemas de conversión bioquímicos de los RSU 863
6.1. Los residuos fermentables 864
6.2. Tipos de residuos fermentables 866
6.3. Propiedades biológicas de los RSU 866
6.4. Compostaje 867
6.5. Metanización 872
6.6. Co-digestión 874
6.7. Pasteurización de la materia orgánica fermentable 875
6.8. Tratamiento de los residuos homogéneos y contaminados 876
6.9. Eficiencia energética de los diversos sistemas de tratamiento de los RSU 876
7. Vertedero controlado 879
7.1. Definiciones y principales efluentes de los vertederos 881
7.2. Los lixiviados 883
7.3. El biogás 885
7.4. Aportación del biogás al efecto invernadero 889
7.5. Funcionamiento y requisitos de un vertedero controlado o relleno sanitario 889
7.6. Limitaciones que impone la directiva relativa al vertido 892
7.7. Los pretratamientos previos al vertido 893
7.8. Vertederos secos 895

7.9. Evolución del coste de vertido 896
8.. Otros sistemas de tratamiento 897
8.1. La peletización 897
8.2. La separación húmeda 897
8.3. Separación por flotación 898
8.4. Proceso bio-líquido 898
8.5. Sistema termoneumático 900
8.6. El tratamiento con cal 900
8.7. La higienización por vapor 900
8.8. Tratamiento por microondas 901
9. Resumen y conclusiones 902
9.1.. Costes de tratamiento de los RSU 903
9.2. RSU y energías renovables 904
9.3. Análisis del Ciclo de Vida (ACV) en el tratamiento de los RSU 905
Bibliografia 906

RESUMEN

Después de una necesaria introducción, este capítulo lleva a cabo una caracterización de los RSU, prestando especial atención a los componentes tóxicos presentes y su evolución en función de la renta económica disponible.

La parte más extensa esta dedicada a los diversos sistemas de tratamiento y valorización de los RSU, resaltando las ventajas e inconvenientes de cada vía de gestión.

En la última parte se comentan algunos sistemas modernos de valorización y finalmente se analizan los diversos costes de tratamiento así como su previsible evolución.

1. Introducción

El concepto de residuo urbano hace referencia a todos aquellos residuos cuya recogida y gestión la lleva a cabo la municipalidad, de ahí que en diferentes países pueda diferir la denominación y la composición de estos residuos. En España los residuos municipales, también denominados domiciliarios o residuos sólidos urbanos (RSU) comprenden:

Residuos domésticos: los procedentes de los hogares.

- Residuos asimilables a urbanos: aquellos residuos procedentes del comercio, las oficinas y servicios. Aquí se incluyen los generados por mercados municipales, comedores públicos, hospitales (no los residuos sanitarios), etc., que debido a su problemática específica ya contaban con recogida especial.
- Limpieza de calles, parques, playas, etc.

Estos residuos son, según la ley, responsabilidad del productor, en la misma medida que los generadores de residuos industriales son responsables de la gestión de la totalidad de sus residuos. Esto, sin embargo, no evita que la mayoría de municipalidades deban hacerse cargo finalmente de estos residuos y que las instalaciones de tratamiento final reciban todos los residuos mezclados, sin importar la procedencia, a menos que se haya realizado una recogida selectiva.

Para comprender el alcance de algunos sistemas que aquí se describen, como la metanización o el sistema de recogida selectiva, es necesario conocer la composición de los residuos y las políticas que se llevan a cabo para su gestión.

De los RSU (residuos sólidos urbanos), una parte de suma importancia es la materia orgánica. En Cataluña, los denominados genéricamente residuos orgánicos suponen algo más del 40% en peso de los RSU. De hecho, el adjetivo orgánico, si bien es correcto, es incompleto puesto que se trata específicamente de residuos fermentables, de ahí la gran problemática ambiental que generan. El término FORM (fracción orgánica del residuo municipal) hace referencia a los restos de comida en general, fruta y verdura, carne y pescado, cáscaras de huevo y frutos secos y papeles de cocina usados. También incluye los restos de jardín de pequeño tamaño, puesto que los residuos de poda o en grandes cantidades deben ser depositados en España en instalaciones específicas, los puntos limpios o verdes. Sin embargo, todos aquellos residuos que son asimismo fermentables pero que deberían ser recogidos y tratados aparte, como papel y cartón, tejidos naturales (algodón) y pieles no se incluyen en el concepto de FORM. A efectos de algunos de los tratamientos que aquí se describen tanto estos residuos como otros degradables y combustibles (tejidos sintéticos, plásticos) pueden estar incluidos al hablar genéricamente de orgánicos, ya que en los casos en que se parte de recogida de residuos en masa estos materiales están mezclados con la FORM.

En España, La Ley 10/1998 de 20 de abril de Residuos, en su artículo 20, obliga a todas las municipalidades de más de 5.000 habitantes a recoger selectivamente y tratar la FORM. Ello ha supuesto un fuerte impacto, tanto social como económico, para las comunidades que lo han implantado, ya que la fracción fermentable es mayoritaria y además es la más conflictiva desde el punto de vista ambiental por diversos motivos:

- Cerca de un 80% de esta fracción es agua, lo que propicia la lixiviación de los componentes contaminantes que pueda llevar asociados.
- Es la fracción más fácilmente contaminante debido a la humedad. Una parte de la contaminación está presente de antemano en la propia fracción fermentable, como pesticidas o antibióticos, pero la más significativa procede del contacto de esta fracción con productos tóxicos, como: pilas, pinturas, productos de limpieza, bolsas de plásticos de supermercado impresas y todo tipo de productos químicos del hogar. El contenido de productos tóxicos de los RSU se cifra entre un 0,5 y un 1% en peso.

La Directiva 1999/31/CE relativa al vertido ha puesto fin a la práctica más habitual de tratamiento de esta fracción, el vertido, puesto que a partir de 2005 solo se podrá verter un 50% de la materia orgánica que se vertía, como indica la Figura 11.1, en 1990, año que se toma como referencia. Hay algunos países, básicamente centroeuropeos, que ya hace tiempo que aplican la directiva con lo que, prácticamente, no utilizan el vertedero.

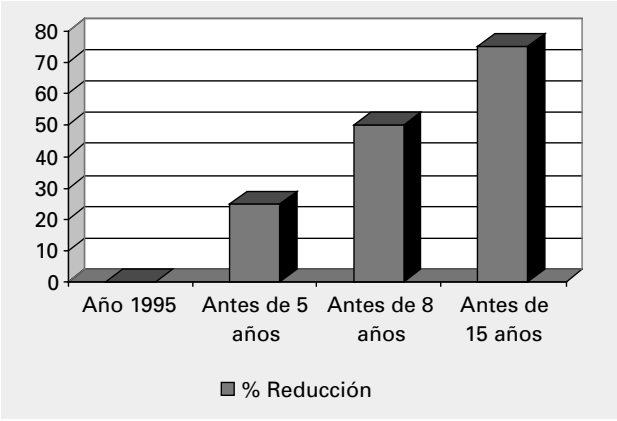


Figura 11.1. Reducción de la fracción orgánica destinada al vertedero.

1.1. MODELOS DE GESTIÓN DE LOS RSU

En la Unión Europea y en general en el resto de los países industrializados, existe una unanimidad en la manera de enfocar la problemática del tratamiento de los residuos. A grandes rasgos la citada política establece la siguiente jerarquización:

- *Minimización.* Deben fomentarse todos los procesos que supongan una reducción de la generación de residuos. En el caso de los RSU ello pasa por la educación ambiental y por el cambio de hábitos en el consumo.
- *Valorización.* Una vez producido el residuo se debe recurrir a toda una serie de técnicas para su reutilización. Para los RSU la primera opción de reciclaje pasa por la recogida selectiva y la recuperación de todas aquellas materias que puedan volver a usarse. El reciclaje por medio de las fracciones presentes en los RSU es relativamente fácil cuando estas proceden de la recogida selectiva. Finalmente se debe educar al ciudadano para que emplee con preferencia los materiales reciclados. Las estadísticas demuestran que la percepción que tiene el ciudadano sobre el empleo de productos reciclados es negativa y ello se debe combatir con la educación ambiental.
- *Tratamiento.* Se denomina así a todos aquellos procesos que tienen como fin reducir la toxicidad del residuo pero cuyo destino final es el vertedero. Así, los pretratamientos, como el típico tratamiento fisicoquímico, es un proceso de reducción del impacto por medio de la estabilización como paso previo al vertedero. Con la valorización energética, al menos, se recupera energía.

La comunidad internacional establece este orden de prioridad preconizando, si conviene, un tratamiento fiscal a favor de la valorización y la minimización y una penalización a los tratamientos, en particular al vertido, extremo en el que se muestra claramente beligerante.

En la gestión de los RSU existen, de forma simplificada, tres formas básicas:

- La recogida selectiva.
- El triaje en planta y valorización.
- El tratamiento (es decir, básicamente el vertido).

Como pretende simbolizar el esquema de la Figura 11.2, el futuro de la sostenibilidad en la gestión de los RSU pasa por la recogida selectiva. Muchos de los problemas que existen en las ciudades, en particular las del sur de la UE derivan de un urbanismo vertical que imposibilita la colocación de los contenedores necesarios. Cuando el material, recogido selectivamente, llega a las plantas de triaje, aquel está razonablemente limpio y ello facilita su reciclado.

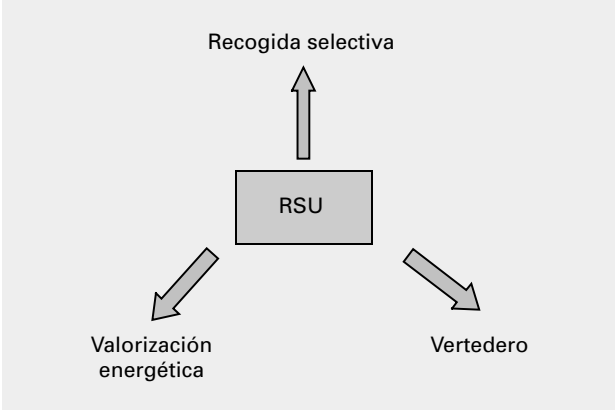


Figura 11.2. Modelos de gestión de los RSU.

Cuando, ya sea por motivos técnicos o económicos, no existe posibilidad de llevar a cabo una recogida selectiva con contenedores en las calles, una solución alternativa es la valorización energética. En cualquier caso la última opción debería ser el depósito en vertederos ya que de ellos lo único posible de recuperar es el biogás, en la hipótesis de que el relleno disponga de sistema de desgasificación.

Como se verá más adelante existen infinidad de estudios donde se demuestra que los componentes químicos tóxicos que integran los RSU aparecen en los lixiviados y en el biogás, de ahí uno de los motivos y necesidades de tratamiento de estos vectores.

El problema grave sobreviene cuando el vertedero en cuestión no dispone de plantas de tratamiento de lixiviados o de biogás.

1.1.1. El nuevo modelo a implantar en Cataluña

El Gobierno Autónomo ha propuesto un plan de gestión de residuos municipales para 2007-2012 que intenta seguir las directrices de minimización, valorización y tratamiento. De esta manera se pretende potenciar la recogida selectiva y manejar (seleccionar) todas las fracciones con el objetivo de que lo que vaya a ser destinado a tratamiento final sea mínimo. El esquema general queda reflejado en la Figura 11.3.

El modelo es complejo, como también lo es una sociedad desarrollada, y parte de dos principios:

- Fomentar la recogida selectiva. Para ello se invertirá una importante cantidad de dinero en educación ambiental y medios. Los materiales recogidos en los contenedores van a parar a plantas de selección. El material seleccionado y desclasificado (ahora ya no son residuos) se envía a las plantas de reciclaje. El rechazo se debe tratar en otras plantas.
- Evitar que el RSU, procedente del «todo uno» (fracción resto) que hoy por hoy es la mayoría, vaya directamente a las plantas de tratamiento finales: incineradoras o vertederos, sin antes sufrir un tratamiento previo, técnicamente denominado pretratamiento.

1.1.2. Las barreras al reciclaje

La percepción que tiene el ciudadano sobre los materiales reciclados, no sobre el reciclaje como tal, es mala. La gente tiene tendencia a pensar que un material reciclado es, por definición, de una calidad inferior a uno «virgen». Desde el punto de vista estrictamente técnico, esto puede ser cierto para el papel (el papel reciclado tiene una longitud de fibra más corta y ello hace que sus prestaciones sean muy inferiores en comparación con el papel fabricado con fibra larga, pero perfectamente válido para un sinfín de aplicaciones efímeras como puede ser su empleo para la confección de periódicos) y parcialmente para el plástico. Todo ello hace que existan unos impedimentos o barreras que pueden sintetizarse en:

- *Problemas logísticos:* Las mayores dificultades acontecen en las etapas de recogida en la ciudad y clasificación (los costes de esta etapa pueden llegar al 70% del total de la gestión). Por lo general no existen problemas técnicos en la maquinaria precisa para el reciclaje de los productos recogidos y clasificados.

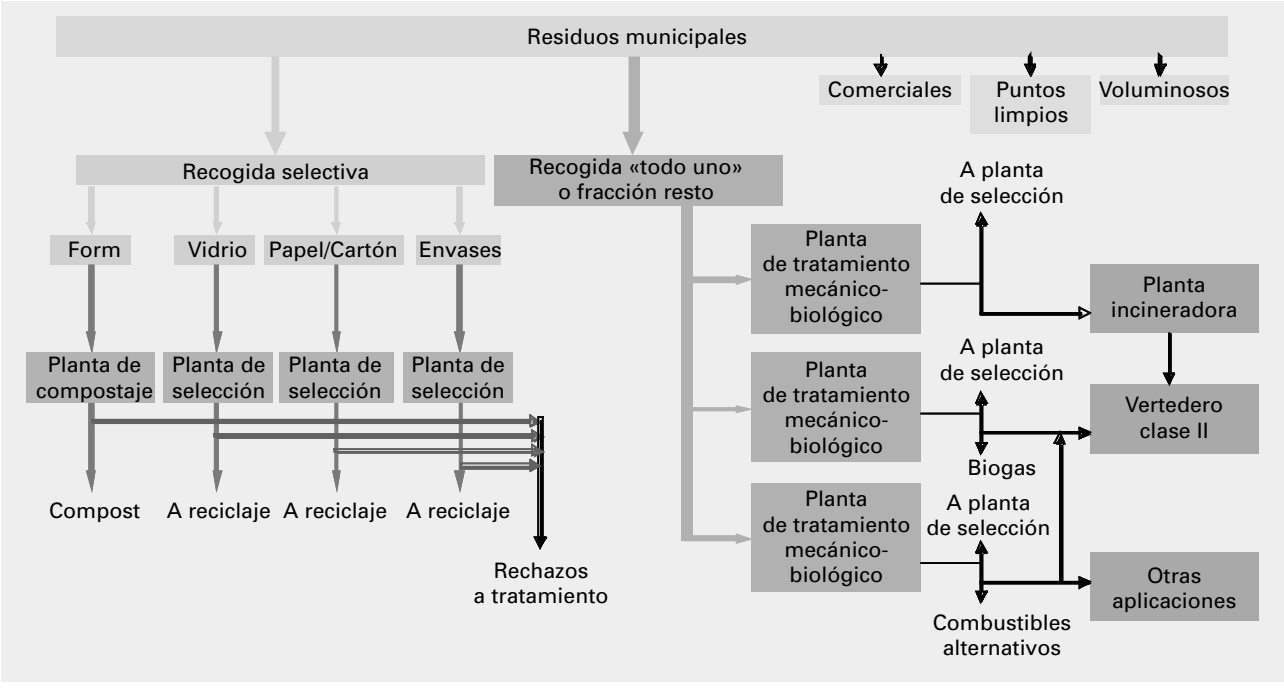


Figura 11.3. Modelo de gestión de los RSU en Cataluña para 2007-2012.

- *Problemas políticos:* Los programas promovidos desde la Administración Ambiental deben ir encaminados a fomentar la recuperación, el reciclaje y la reutilización. En muchos casos es la propia administración ambiental quien debiera dar ejemplo del fomento al reciclado usando papel reciclado en sus oficinas, confeccionando pliegos de condiciones donde sea obligado emplear compost en los taludes de obras públicas que promueva, etc.
- *Problemas técnicos:* Que duda cabe que existen ciertos colectivos industriales que no les hace mucha gracia la incursión en el mercado de nuevos materiales que entren directamente en competencia con los suyos. Una manera de ponerles impedimentos es creando normas técnicas de especificación de propiedades (esto es muy frecuente en el mundo de los plásticos. Los termoplásticos reciclados no pueden alcanzar las mismas prestaciones técnicas que sus homólogos fabricados a partir de material virgen) o, por el contrario: no permitir que se lleve a cabo una normalización y, en este caso no se compra el material por falta de estandarización.
- *Problemas financieros:* La recogida selectiva es cara. Para interesar a la iniciativa privada es preciso arbitrar fórmulas de ayuda financiera.
- *Problemas de mercado:* Deberá realizarse un estudio de colocación de los materiales reciclados antes de la puesta en marcha del programa de recogida selectiva y reciclaje.

Finalmente, a veces es la propia administración ambiental que impide, por desconocimiento, la fabricación de determinados materiales cuando el residuo contiene ciertos niveles de contaminantes. Cuando se obliga a pasar test de calidad a todos los materiales, con independencia del origen de las materias primas, a veces resulta que el reciclado es de mayor calidad que el «virgen», como aconteció con los primeros aceites minerales reciclados.

1.2. RECOGIDA SELECTIVA Y MINIMIZACIÓN

La minimización de los RSU en general, y de los residuos tóxicos contenidos en ellos en particular, es una tarea de gran envergadura ya que depende de muchos parámetros difíciles de controlar, como:

- Información a la ciudadanía en general sobre los componentes peligrosos que cada día maneja.
- Educación de la población para que utilicen lugares apropiados para depositar este tipo de residuos (los «puntos verdes» o limpios).
- Concienciación de los comerciantes sobre la posibilidad de venta de ciertos productos menos agresivos con las personas y el medio ambiente.
- Convencer, u obligar a los fabricantes, de la necesidad de ir eliminando paulatinamente de los productos aquellos componentes tóxicos.

Las autoridades ambientales son conscientes de ello y algunas de ellas, como la Entidad del Medio Ambiente del Área Metropolitana de Barcelona en su Programa de Residuos Municipales correspondiente al periodo 1995-2000 se propuso la disminución del 60% de los Residuos Peligrosos en los RSU.

Los programas de educación ambiental tienen por objetivo concienciar y sensibilizar a la población acerca del medio ambiente y sus problemas. Las actividades planificadas para los programas de educación ambiental se desarrollan en diferentes fases y se dirigen a diversos sectores de población. Una guía bien completa, para explicar a la ciudadanía las ventajas de la recogida selectiva, podría ser la enumerada en los puntos siguientes:

- Es el sistema más avanzado que permite recuperar materiales.
- Es requisito imprescindible recoger la fracción orgánica del residuo municipal para poder, después, elaborar un compost de calidad. Es altamente recomendable si se desea realizar un proceso de digestión anaerobia.
- Es el único modelo que garantiza eficacia en el reciclaje de las fracciones de papel, plástico y vidrio.
- Siempre aparece una fracción residual (fracción de rechazo o resto) que deberá ser tratada mediante incineración o depositada en vertedero.

1.2.1. Casos prácticos de gestión selectiva

Aunque más adelante se estudiará la problemática de los residuos tóxicos presentes en los RSU, en este apartado introductorio se exponen, a título de ejemplo, algunos casos.

Los medicamentos usados: los específicos guardados en botiquines, al igual que las pilas, pueden resultar muy peligrosos: uno de cada tres ingresos en centros hospitalarios se debe al consumo de medicamentos en mal estado y a la automedicación. Según

las estadísticas, uno de cada cuatro europeos reconoce que arroja medicamentos por el lavabo. Ello sumado a que, una parte notable los compuestos activos de muchos fármacos, son excretados conlleva a una contaminación importante en la mayoría de los ríos. A la salida de muchas depuradoras se han detectado concentraciones de ibuprofeno (3.000 ng/l) diclofenaco (1.000 ng/l) o naproxeno (1.900 ng/l).

En España, casi 20.000 farmacias cuentan con contenedores especiales desde 2002 dentro del denominado Sistema de Gestión de Residuos de Envases del Sector Farmacéutico (SIGRE). Los usuarios depositan los fármacos caducados que después se tratan adecuadamente. Los resultados conseguidos, en 2004, han sido de 56.728 kg recogidos en farmacias y 77.155 kg de medicamentos recogidos en los CAPS (Centros de Asistencia Primaria Sanitaria).

Los teléfonos móviles: Para dar una idea de la toxicidad de los teléfonos móviles cuando devienen residuos basta con indicar que contienen más del 1%, en peso, de cada uno de los siguiente componentes: Plásticos bromados (retardantes de llama), Ni y sus compuestos, Zn y sus compuestos, Ag y sus compuestos y en menor cantidad Al, Sn, Pb, Au, Mn, etc.

La UE subvenciona el proyecto «Tragamóvil», destinado al tratamiento de estos componentes electrónicos. Se calcula que los más de 12 millones de móviles vendidos en 2002 estarán en desuso en 2004. El primer año del proyecto «Tragamóvil» se recogieron mas 550.000 teléfonos, que se trataron debidamente.

Las gafas usadas: A diferencia de los anteriores, no se trata de un residuo peligroso y el enfoque de gestión es muy diferente. Ahora lo que prevalece es la valorización. Aunque el uso de las gafas es un hábito corriente, muchas personas del tercer mundo no pueden permitirse si quiera un examen ocular. En este sentido la Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que la calidad de la vista de una cuarta parte de la población del planeta podría mejorar gracias al uso de lentes. Para ello se han colocado mini contenedores en la mayoría de las ópticas para echar los lentes viejos. Estos se clasifican, se revisan y se mandan a unas ONG que las reparten cuidadosamente.

1.2.2. El tratamiento térmico

Es el modelo recomendado alternativo cuando no se dispone de medios para implantar una recogida selectiva. Por otra parte en determinadas poblaciones, tal es el caso de París, se ha optado por esta modalidad por motivos de logística, urbanismo, estética, tráfico y demografía. Esta opción parece ser la orientación general de la UE frente a los graves problemas actuales.

El modelo se puede complementar con:

- Una selección previa en la propia planta de valorización energética de las fracciones fácilmente recuperables, cartón, vidrio y metales. El resto se valoriza energéticamente generando electricidad y las escorias resultantes de la planta se valorizan como áridos para rellenos de terraplenes o subbases de carreteras.
- Permite tratar adecuadamente la fracción de residuos peligrosos contenida en los RSU.
- En el sistema de incineración con generación de electricidad el coste de explotación oscila entre 15 y 25 €/tonelada (sin considerar el coste de transporte) en función del precio de venta del kilovatio eléctrico y la magnitud de la planta.

1.2.3. El vertido

Es el modelo actualmente mayoritario en España. Es importante puntualizar que la mayoría de las instalaciones que hoy en día hay en el país son vertederos controlados, que se diferencian de los vertederos incontrolados en lo siguiente:

- *Vertederos no controlados:* son instalaciones en las que no se ha tenido en cuenta los flujos de contaminantes que se generan y transfieren, tanto al suelo y las aguas (lixiviados altamente tóxicos), como a la atmósfera (gases de elevado efecto invernadero y otros compuestos contaminantes). No garantizan, por tanto, las condiciones sanitarias y ambientales necesarias.
- *Vertedero controlado:* los modelos obligados por las directivas comunitarias en la UE, que contemplan la obligación de tratamiento de lixiviados y gases exigen a un determinado sistema de explotación y clausura, lo que supone un coste de operación aproximado de 27€ por tonelada de residuos depositada (sin considerar el coste de transporte).

1.2.4. El modelo español

La Tabla 11.1 muestra el resumen de la gestión de los RSU en España en 2001. Salta a la vista que el resultado dista mucho de ser el más recomendable desde la óptica de la preservación del medio ambiente y la valorización.

Tabla 11.1. Sistemas de tratamiento de los RSU en España en 2001

Modo de gestión	t/año	%
Recogida selectiva	1.189.382	6,22
Compostaje	4.533.466	23,70
Incineración con recuperación de energía	1.061.863	5,55
Incineración sin recuperación de energía	17.104	0,09
Vertedero controlado	10.926.524	57,14
Vertedero incontrolado	1.395.323	7,30

De acuerdo con la tabla y siguiendo el esquema clásico de jerarquización en la gestión de los residuos, el resumen de la gestión global de los RSU en España es:

- Algo más del 6% se recoge selectivamente. En algunas zonas de España, se ha alcanzado, en 2004, el 20%.
- La valorización que incluye el compostaje y la incineración con recuperación de energía se acerca al 30%. Si bien hay que avanzar que parte de este compost (el denominado compost gris) va a parar al vertedero y otra parte se incinera.
- El tratamiento supera el 64%, con un vergonzoso 7,3% de vertido incontrolado.

En la UE, la tendencia general, por lo que hace referencia al tratamiento de residuos es a acercarse a una proporción equidistante entre el reciclado (33%), el compostaje e incineración (33%) y el depósito controlado (33%). Sin embargo, hay algún estado, como los Países Bajos, donde la proporción es alrededor de un 40% para el reciclaje y el resto valorización energética, sin apenas vertido. El resultado español también contrasta con lo anunciado por el Gobierno Danés que se ha propuesto que, en 2008, el resultado sea: Reciclaje 65%, incineración 26% y 9% a vertido.

1.3. OTROS CONCEPTOS RELATIVOS A LA GESTIÓN DE LOS RSU

Aunque sea a título de introducción y definición vale la pena hacer mención de un conjunto de operaciones relacionadas con la gestión de los RSU.

1.3.1. La recolección

Es la operación de recoger los residuos sólidos en los sitios donde se hallan depositados que puede ser la acera delante de la vivienda, un contenedor destinado a tal fin o un área de almacenamiento. El sistema suele decidirlo la autoridad municipal.

Los camiones, que suelen llevar a cabo la recolección por la noche (situación muy contestada por colectivos de vecinos ya que es un proceso ruidoso), conducen el residuo a la planta de tratamiento, a la planta de selección o la estación de transferencia, según proceda.

En el caso de que la población disponga de un cierto grado de recogida selectiva, es obvio que deberá realizar tantas recolecciones como residuos se separen. En el caso de la fracción fermentable, la frecuencia de la recolección depende de la temperatura ambiente. Si esta es mayor de 20 °C, la recogida debe ser diaria.

En algunas ciudades existe una modalidad denominada «recogida neumática» que consiste en depositar la bolsa de basura, ya sea el «todo uno» (o mezclado) o la fracción de residuo que sea, en un tubo que lo conduce a un contenedor de almacenamiento temporal. El camión de recogida dispone de un sistema neumático que succiona la bolsa. A veces, el compresor está ubicado en el propio edificio de vivienda.

Por regla general la recolección y transporte la realizan empresas privadas subcontratadas por el ayuntamiento una vez ganado un concurso.

1.3.2. Contenedores

Son considerados como el lugar temporal de disposición de los residuos provisional, hasta el momento de la recolección.

Existen infinitos tipos de contenedores. Se diferencian en la forma, la calidad (plástico, acero), la capacidad (los hay hasta de 25 m^3), la forma de llenado y vaciado (lateral, frontal, etc.), pueden ser aéreos o subterráneos.

La Figura 11.4 muestra un ejemplo de contenedores de 1,5 m^3 para la recogida selectiva en la ciudad de Barcelona, donde aparecen los contenedores para la recogida de vidrio, papel/cartón y envases ligeros. Por lo general se prefiere que los contenedores presenten un diseño agradable y tengan tapa para evitar la presencia de fauna nociva, desprendimiento de malos olores y actos vandálicos.

La Figura 11.5 muestra uno de los muchos sistemas que existen para el vaciado de los contenedores de recogida selectiva.

Figura 11.4. Contenedores aéreos para la recogida selectiva.

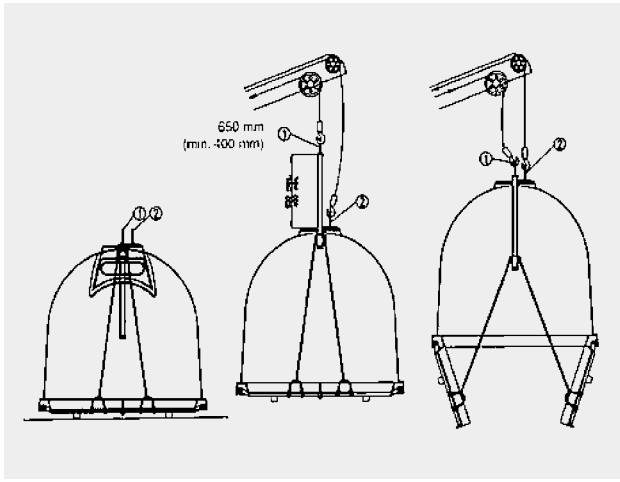


Figura 11.5. Sistema de vaciado de un contenedor de recogida selectiva.

En algunas localidades existen contenedores que disponen de un registro automático de peso. Esto se utiliza para compensar a los vecinos en el caso de que lleve a cabo un programa de minimización.

En el DVD adjunto, en el punto 1, se muestra información sobre tipos de contenedores y sistemas de ubicación y descarga.

1.3.3. Transporte y compactación

Existen infinitos tipos de camiones de recogida de residuos. La diferencia esencial es si van destinados a la recogida de contenedores selectivos o bien de RSU «todo uno» o a granel. Ello condiciona una de las diferencias entre los sistemas de carga frontal, lateral o trasera.

Cuando el camión debe realizar largos recorridos o su destino es una planta de transferencia se recurre a la compactación. Existen centros de actividad donde es frecuente la compactación:

- En ciertas urbanizaciones.
- En centros comerciales.
- En plantas de transferencia.

En el primer caso el sistema de compactación empleado consiste en pequeñas prensas manuales, mientras que en los dos últimos las prensas son hidráulicas y pueden lograr que el volumen compactado llegue a ser el 20% del volumen original.

Los sistemas de compactación han de partir de la base de que la densidad media de un RSU es del orden de los 600 kg/m^3.

Los transportes de carga «Roll Off», son vehículos tipo trailer para poder efectuar el intercambio de contenedores de capacidad de hasta 30 m^3. Este sistema es apto para la recolección de altos volúmenes de residuos sólidos difíciles de compactar.

El sistema de transporte debe determinar su plan de rutas y horarios adecuados para la recolección doméstica y comercial, así como los puntos habilitados para ello. Finalmente existe también un transporte a larga distancia que suele realizarse en tren, a partir de contenedores/compactadores que son cargados directamente en vagones de ferrocarril.

1.3.3.1. Recogida y transporte neumático

Es una modalidad de recogida de RSU en viviendas, o en la vía pública. Pueden actuar en forma de recogida selectiva si se sitúan tres o cuatro contenedores, a veces soterrados en la vía pública (ello es una buena alternativa para los cascos antiguas de las ciudades donde no se dispone de espacio para instalación de contenedores aéreos), o como recogida de la bolsa única del «todo uno».

En Barcelona en 1992, en la Villa Olímpica, se instaló el primer sistema para atender a 6.000 viviendas. En la instalación estándar, los vecinos, desde su propia vivienda, o desde el subterráneo depositan las bolsas en diferentes «buzones», el transporte neumático las conduce hasta un buzón común a una agrupación de viviendas donde un camión succiona las bolsas para su transporte. El aire de transporte es filtrado antes de ser devuelto a la atmósfera.

Las bolsas deben ser resistentes, nunca demasiado llenas y bien cerradas, para evitar que se derrame el contenido durante el transporte.

En el DVD adjunto, en el punto 2, se muestra información complemetaria sobre el sistema de recogida neumática.

1.3.3.2. Compactación y confección de balas

En muchos centros de gestión de residuos se ha implantado la compactación como medida para prolongar la vida de los vertederos. El sistema consiste en hacer balas de residuos de gran tamaño aseguradas con alambres o flejes de plástico y, a veces se recubren de plástico. De hecho, la bala recubierta de plástico lleva a cabo ciertas acciones de contención de los contaminantes generados por la fracción fermentable ya que frena el proceso de fermentación anaerobia antes de que ésta alcance la fase de acidogénesis. En teoría, las principales ventajas del empleo de balas plastificadas se pueden resumir en:

- El material queda protegido de la entrada de aire y agua.
- La temperatura en el interior del paquete (bala) sigue la temperatura exterior (esto solo es cierto si la bala esta expuesta a los cuatro vientos).
- Las emisiones son reducidas, en particular de olores.

En el caso de los RSU, con una humedad entre el 40% y el 50%, la densidad es del orden de 250-300 kg/m^3 y, una vez compactado y plastificado, en balas de un volumen superior a 1,5 m^3, la densidad puede alcanzar los 1.100 kg/m^3. En el caso del rechazo (por lo general casi exento de fracción fermentable) la humedad es inferior al 40% y la densidad inicial de 170 kg/m^3 y, una vez compactada, la bala puede alcanzar una densidad de 800 kg/m^3, o sea una ratio de compactación de 4.

Las balas también pueden tener una geometría cilíndrica, con un volumen algo inferior a las paralelepípedas. La Figura 11.6 muestra un ejemplo de un vertedero con balas sin plastificar.

Desde el punto de vista de la gestión, un vertedero de balas aporta ciertas ventajas con respecto a los tradicionales:

- Aumenta la vida útil del vertedero.
- Mejora las condiciones sanitarias (evita el volado de papeles y plásticos y reduce la presencia de aves y roedores).
- Proporciona mayor estabilidad mecánica al vertedero.
- Precisa una menor cantidad de material de cobertura.

En el DVD adjunto, en el punto 3, se muestra información complementaria sobre el sistema de confección y compactación de balas.

1.3.4. Sistemas de transferencia

Los residuos sólidos se transfieren de los centros de recolección a las unidades de gran capacidad a través de un sistema de compactación que permita una mayor capacidad de transporte para cuando las distancias a recorrer hasta el destino superen los 25 km.

Figura 11.6. Vertedero de balas.

La compactación tiene por objeto formar balas de alta densidad, como las mencionadas en el apartado anterior, ya sea con los RSU o con residuo seleccionado papel, plástico, etc.

Por lo general el sistema de compactación consta de una tolva sobre la que descargan los camiones que transportan carga convencional. Una cinta transportadora alimenta de forma dosificada una prensa de funcionamiento automático. La capacidad y dimensión de la planta está en función de las necesidades específicas de cada instalación o municipio.

El producto de la prensa compactadora es una bala, de geometría paralepipédica que puede ser apilada, almacenada o transportada. Los RSU, o sus rechazos, se logran compactar con una presión del orden de 20 kg/cm^2, confiriéndoles una densidad de 800 a 1.200 kg/m^3 y una estabilidad a las balas perdurable incluso si se rompe el zuncho de alambre o el envoltorio de plástico retráctil.

Estas balas están pensadas, esencialmente para el transporte. En el caso de los RSU, teniendo en cuenta que la cantidad de material fermentable es importante, también lo será el agua y, con el tiempo el lixiviado. Las instalaciones de compactación deben disponer de un sistema de drenaje en toda la planta y de una balsa de recolección de líquidos para ser tratados.

1.3.5. El tamaño de los componentes de los RSU

En los RSU el tamaño de los componentes y su distribución por fracciones es una característica muy importante para la recuperación de materiales, especialmente con medios mecánicos como cribas, mesas densimétricas, trómeles o separadores magnéticos. Por regla general, el tamaño de partícula hace referencia a la dimensión más larga y su capacidad para pasar por la luz de malla de un tamiz.

La Figura 11.7 muestra la distribución típica de tamaño (en cm.) de los componentes estándar presentes en los RSU. Como nota más sobresaliente hay que destacar que el componente mayoritario, la fracción orgánica fermentable (cuyo porcentaje, en el caso del Área Metropolitana de Barcelona, oscila alrededor del 40% en peso) tiene un tamaño relativamente pequeño, estando el valor medio en torno a los 8 cm., lo cual facilita su separación. No obstante, ahí radica uno de los problemas importantes relacionados con la presencia de residuos peligrosos urbanos (RPU) presentes en los RSU, ya que estos suelen tener un tamaño pequeño y, al mezclarse con esta fracción, se contamina todo.

1.4. PROBLEMÁTICA ASOCIADA A LOS COMPUESTOS TÓXICOS

La recogida selectiva es, sin lugar a dudas, el futuro para una gestión sostenible de los RSU y en particular para el tratamiento adecuado de los RPU. En nuestras poblaciones es frecuente ver minicontenedores para la recogida de pilas, pero desgraciadamente esto es solo una pequeña parte de los incontables RPU y parece que la única solución viable es la proliferación y uso masivo de los «puntos verdes», donde es posible habilitar contenedores para la recepción de un sinfín de residuos más o menos peligrosos, ya sean sólidos o líquidos.

Según datos publicados por el Departament de Medi Ambient de la Generalitat de Cataluña, en 2003 se generaron 3.976.118 toneladas de RSU para una población de 6.704.146, lo que equivale a una

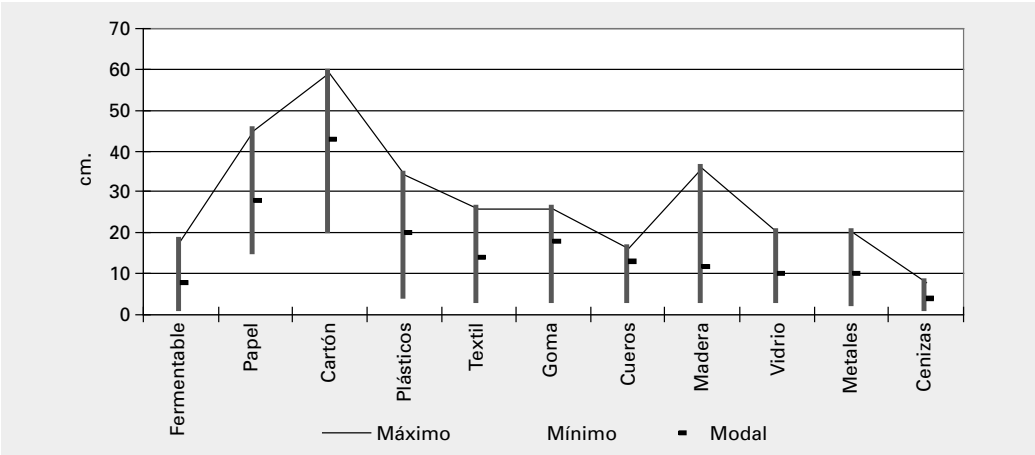


Figura 11.7. Tamaño estándar de las fracciones en los RSU.

tasa de 1,62 kg/h · día, de las que recogieron de manera selectiva 749.631 toneladas, o sea un 18,85%.

En el año 2003 se calcula que 250.000 personas habían usado los 41 «puntos limpios» del Área Metropolitana de Barcelona y se había logrado recuperar hasta 700 toneladas de RPU. Esta cifra, siendo muy importante, representa solo 0,008 kg RPU/habitante y día. Teniendo presente que 250.000 personas suponen el 5% de la población del Área Metropolitana, y que estos habitantes generaron 0,05 · 1,6 = 0,080 kg RPU/día, la tasa de recuperación de RPU es del 9,6%. Como punto de referencia, el Área Metropolitana de Viena, alcanzó en 2002, una cuota de recuperación de estos residuos peligrosos del 25%.

1.4.1. Compuestos tóxicos en materiales que acaban en los RSU

Una normativa europea pretende acabar con la falta de control sobre las más de 30.000 sustancias químicas de uso masivo que nos acompañan a diario (por ejemplo, los retardantes de llama presentes en los equipos electrónicos, los compuestos utilizados para ablandar el plástico, los pesticidas, las tintas de las impresoras, el esmalte de uñas, el tinte del pelo, el teléfono móvil, componentes del ordenador, etc.). En la UE hay 100.106 sustancias químicas registradas que sirven para fabricar ordenadores y teléfonos móviles más ligeros, aparatos modernos usados en medicina, abaratar costes, aumentar las cosechas y reducir las plagas. Pero también están detrás del aumento de las alergias, el asma, el cáncer, las disfunciones hormonales y la infertilidad, según destacados científicos.

La Unión Europea se lanzó, en 2.000, al ambicioso empeño de controlar el registro y la autorización de estos productos. La idea era pedir a la industria que demostrase la seguridad de sus productos antes de permitir su autorización y obtener datos de los ya existentes. El problema es que los efectos se ven a largo plazo y de forma estadística: es imposible afirmar que el asma, una alergia o un problema hormonal concreto se debe a un determinado producto químico presente en la vida cotidiana, pero sí se ha detectado un aumento de este tipo de problemas.

La propuesta de la Comisión Europea para el reglamento REACH (registro, evaluación y autorización de químicos, en sus siglas en inglés), comienza con un reconocimiento preocupante: «Es difícil obtener información sobre las sustancias [...] Hay una carencia general de conocimientos a disposición de la población acerca de las propiedades y usos de las sustancias existentes [...] En muy pocas sustancias se ha hecho una determinación del riesgo». El texto señala que, aunque los productos tengan riesgo, es casi imposible establecer una relación entre el daño y la sustancia por falta de ensayos contrastados.

Aunque los científicos coinciden en que es necesario más control, el acuerdo sobre cómo hacerlo es misión casi imposible: hay en juego miles de millones de euros y muchos sectores industriales (desde los automóviles a las pinturas) tendrían que cambiar algunas de sus materias primas. La Federación Empresarial de la Industria Química Española (Feique) asegura que la propuesta de REACH es inaplicable por burocrática, que puede ocasionar el cierre a muchas pequeñas empresas que no podrán soportar el coste de investigar cada producto y que supondrá la pérdida de competitividad de la industria europea ante las importaciones. Feique afirma que los productos son seguros, que las cantidades detectadas son infinitesimales y que los beneficios de la química en la vida cotidiana superan a los inconvenientes. Por su parte, el Comité Europeo de Médicos firmó en 2005 un documento en el que muestra su «preocupación por el desconocimiento del impacto sobre la salud y el medio ambiente de numerosas sustancias químicas». Un grupo de destacados científicos, incluidos dos premios Nobel, ha suscrito un manifiesto que asegura que «la polución química representa una seria amenaza para la salud».

La industria química encargó un estudio en el que afirma que REACH supondrá un sobrecoste de un 20% para las pequeñas empresas y que pone en riesgo 280.000 empleos. Bruselas contrastó con otro informe que cifra el coste de aplicación en unos 5.000 millones de €, algo que considera asumible, y que sólo el asma y las alergias atribuibles a los productos químicos en Alemania origina un gasto anual superior. Además, afirma que la norma evitaría más de 2.000 casos de cáncer al año. Las cifras son parte de la «guerra química» que vive Bruselas desde hace años.

Representantes de más de 400 científicos agrupados en el proyecto europeo CASCADE (www.cascadenet.org) han hecho público un documento en el que se pide el máximo apoyo para el proyecto REACH.

Los grupos de compuestos químicos más contestados son:

- *Polibromodifeniléter.* Retardante de llama en ropa y ordenadores, televisores, pijamas para niños y tapicerías de cines, entre otras muchas cosas, han

sido fabricados con unas sustancias llamadas PBDE (polibromodifeniléteres). Comenzaron a usarse en los televisores y han proliferado por su capacidad para retrasar la propagación del fuego, una ventaja fuera de duda. Sin embargo, algunos científicos aseguran que a altas dosis pueden afectar el sistema hormonal, como el catedrático de Radiología de Granada Nicolás Olea: «Es muy difícil asociarlo a una enfermedad, pero ya se ha detectado en la leche materna y en animales de todo el mundo. Si dentro de unos años se demuestra su efecto, echaremos de menos no haberlo estudiado más».

- *Compuestos persistentes.* El DDT, prohibido en España desde 1977, aparece en alimentos y piensos. Se detecta porque es muy persistente, el cuerpo lo acumula y pasa de un animal a otro. Un estudio, en Granada, detectó DDT en el 98% de la población. El DDT pertenece a un grupo de sustancias persistentes que el cuerpo no elimina y que están relacionadas con problemas hormonales, cáncer y asma. La ONU impulsó en 2001 un acuerdo para erradicarlos.
- *Bisfenol A.* Un derivado con actividad hormonal. El bisfenol A fue descubierto en 1938 junto al dietiletilbestrol, usado aún como tratamiento hormonal. El descubridor, Dodds descartó el bisfenol A porque su actividad era 100 veces menor pero lo clasificó «compuesto estrogénico» es decir, con actividad similar a unas hormonas sexuales femeninas. Décadas después, la industria química recuperó el bisfenol A por su capacidad para polimerizar y conformar plásticos. Actualmente, se encuentra en muchos plásticos. Numerosos estudios en animales afirman que, a bajas dosis, pueden afectar al desarrollo sexual.
- *Parabenos.* Son ésteres del ácido hidroxibenzoico, muy frecuentes en algunos cosméticos. Numerosos investigadores han encontrado parabenos en los tumores de mama y se ha descrito su capacidad para interferir en determinadas hormonas.
- *Endosulfán.* Es uno de los pesticidas más usados. Sólo en Estados Unidos, se utilizan más de 70.000 toneladas anuales. La agencia estadounidense del medio ambiente asegura que aunque el endosulfán puede tener efectos neurotóxicos en el laboratorio, no presenta peligro en la comida. La agencia sí asegura que existe riesgo para los trabajadores, que pueden inhalar el pesticida, y que ha habido casos de toxicidad en animales y peces. España es el mayor consumidor de endosulfán de la UE y un estudio realizado por investigadores de Granada entre 458 mujeres en 2005 detectó que el 70% tenía dosis detectables de endosulfán y que pasaba a la placenta.

En los hogares europeos se emplean a diario compuestos químicos tóxicos, cancerígenos, mutagénicos o reprotóxicos de seis familias:

- *Retardantes de llama bromados* (PRB): incluye unas 200 sustancias que se utilizan para reducir el riesgo de fuego en algunos artículos electrodomésticos (televisores, ordenadores, equipos de audio, neveras, microondas), muebles tapizados y alfombras.
- *Ftalatos* (FTA): compuestos que se añaden al plástico para hacerlo más flexible. Son tóxicos para el sistema reproductivo. Su uso más extendido se halla en la fabricación de juguetes, finalidad para la que 3 de los 6 compuestos más comunes están prohibidos en la UE.
- *Acrilamída* (A): se emplea como floculante en el tratamiento del agua potable. Es un compuesto intermedio (monómero) empleado en la síntesis de poliacrilamida (polímero). Tiene efecto cancerígeno y reprotóxico.
- *Compuestos perfluorados* (PFC): se utilizan en las sartenes antiadherentes y en los tratamientos de impermeabilización. Algunos tienen efectos cancerígenos.
- *Bisfenol A* (BA): se emplea en los productos plásticos dedicados a usos alimentarios. Puede provocar anormalidades genéticas o cromosómicas.
- *Formaldehido* (F): fue calificado como cancerígeno por la OMS en el año 2004.

El informe Alimentos publicado en el 2006 por la WWF/Adena alerta que se han encontrado sustancias químicas sintéticas en alimentos consumidos en toda Europa, desde productos lácteos hasta la carne y el pescado. Algunas de las sustancias más habituales son el pesticida DDT, los PBC (bifenoles usados en componentes eléctricos y electrónicos) y los retardantes de llama bromados. Para la elaboración de dicho informe se tomaron muestras de 27 diferentes tipos de alimentos en España, Reino Unido, Italia, Grecia, Suecia, Finlandia y Polonia.

Se detectó la presencia de sustancias químicas sintéticas potencialmente dañinas en todas las muestras analizadas: ftalatos en el aceite de oliva, quesos y carnes; plaguicidas organociorados, prohibidos desde hace años en la UE, en el pescado y la carne de ciervo; almizcles sintéticos y organotinas en el pescado; y retardantes de llama en las carnes y quesos. En las muestras provenientes de España (jamón curado y queso manchego), se encontraron huellas de algunos tipos de bifenoles policiorados (PCB), plaguicidas organoclorados (OCP), retardantes de llama bromados y ftalatos.

1.5. LA LEY DE RESIDUOS URBANOS. LEY 10/1998

En el presente apartado se lleva a cabo unas reflexiones al hilo de la Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos. La ley está, obviamente adaptada a la correspondiente Directiva Comunitaria 91/156/CEE del Consejo que hace referencia a todo tipo de residuos, si bien en el presente apartado solo se hará mención a aquellos artículos relacionados de manera específica a los RSU.

En la exposición de motivos se hace referencia a que la ley española se acomoda al desarrollo económico de España, a los principios proclamados en la Declaración de Río de Janeiro sobre Medio Ambiente, al desarrollo y a la Agenda 21, firmados por España en la conferencia internacional de Río de Janeiro de 1992 y a los principios de la política comunitaria de medio ambiente, tal como figuran recogidos en el articulo 130.R del Tratado Constitutivo de la Comunidad Europea, tras las modificaciones introducidas por el Tratado de la Unión Europea.

La Ley regula también la forma en que habrá de hacerse la recogida de los residuos urbanos por la entidades locales, el traslado interno y externo de los residuos dentro del margen de limitación de movimientos que a los estados miembros de la UE permiten, dentro del reglamento 259/93, del Consejo de 1 de febrero de 1993, relativo a la vigilancia y control de los traslados de residuos en el interior y a la entrada y salida de la comunidad europea, tomándose como básico el principio de proximidad y regulándose también los supuestos en los que las comunidades autónomas pueden limitar su movimiento dentro del territorio nacional.

Para la consecución de los objetivos de reducción, reutilización, reciclado y valorización, así como para promover las tecnologías menos contaminantes en la eliminación de residuos, la ley prevé que las administraciones públicas, en el ámbito de sus respectivas competencias puedan establecer instrumentos de carácter económico y medidas de incentivación.

Así se atribuye de forma genérica a las entidades locales, como servicio obligatorio, la recogida, el transporte y la eliminación de los residuos urbanos, mientras que en la actualidad solo existe esta obligación para municipios de más de 5.000 habitantes. Igualmente, se obliga a los municipios de más de 5.000 habitantes a implantar sistemas de recogida selectiva de residuos, a partir del año 2001 lo que tampoco estaba contemplado en el articulo 26.2.b de la Ley 7/1985.

Artículo 3. Definiciones

A efectos de la presente Ley, se entenderá por:

a) Residuo: Cualquier sustancia u objeto perteneciente a alguna de las categorías que figuran en el anejo de esta ley, del cual su poseedor se desprenda o del que tenga la intención u obligación de desprenderse. En todo caso, tendrán esta consideración los que figuren en el Catálogo Europeo de Residuos (CER) aprobado por las instituciones comunitarias.
b) Residuos urbanos o municipales: Los generados en los domicilios particulares, comercios, oficinas y servicios, así como todos aquellos que no tengan la calificación de peligrosos y que por su naturaleza o composición puedan asimilarse a los producidos en los anteriores lugares o actividades.
   Tendrán también la consideración de residuos urbanos:
   - Residuos procedentes de la limpieza de vías públicas, zonas verdes, áreas recreativas y playas.
   - Animales domésticos muertos, así como muebles, enseres y vehículos abandonados.
   - Residuos y escombros procedentes de obras menores de construcción y reparación domiciliaria.
c) Recogida selectiva: El sistema de recogida diferenciada de materiales orgánicos fermentables y de materiales reciclables, así como cualquier otro sistema de recogida diferenciada que permita la separación de los materiales valorizables contenidos en los residuos.

Artículo 4. Competencias

Las entidades locales serán competentes para la gestión de los residuos urbanos, en los términos establecidos en esta Ley y en las que, en su caso, dicten las Comunidades Autónomas. Corresponde a los municipios, como servicio obligatorio, la recogida, el transporte y, al menos, la eliminación de los residuos urbanos, en la forma en que establezcan las respectivas ordenanzas.

Artículo 11. Posesión de residuos

En todo caso, el poseedor de los residuos estará obligado, mientras se encuentre en su poder a mantenerlos en condiciones adecuadas de higiene y seguridad.

1) Todo residuo potencialmente reciclable o valorizable deberá ser destinado a estos fines, evitando su eliminación en todos los casos posibles.
2) El poseedor de residuos estará obligado a sufragar los correspondientes costes de gestión.

Artículo 20. Residuos urbanos y servicios prestados por las Entidades locales

1) Los poseedores de residuos urbanos estarán obligados a entregarlos a las entidades locales, para su reciclado, valorización o eliminación, en las condiciones en que determinen las respectivas ordenanzas. Las entidades locales adquirirán la propiedad de aquellos desde dicha entrega y los poseedores quedaran exentos de responsabilidad por los daños que puedan causar tales residuos, siempre que en su entrega se hayan observado las citadas ordenanzas y demás normativa aplicable.

Igualmente, previa autorización del ente local correspondiente, estos residuos se podrán entregar a un gestor autorizado o registrado, para su posterior reciclado o valorización.

2) Los productores o poseedores de residuos urbanos que, por sus características especiales, puedan producir trastornos en el transporte, recogida, valorización o eliminación, estarán obligados a proporcionar a las entidades locales una información detallada sobre su origen, cantidad y características.

Sin prejuicio de la anterior, cuando las entidades locales consideren que los RSU presenten características que los hagan peligrosos de acuerdo con los informes técnicos emitidos por los organismos competentes, o que dificulten su recogida, transporte, valorización o eliminación, podrán obligar al productor o poseedor de los mismos a que, previamente a su recogida, adopten las medidas necesarias para eliminar o reducir, en la medida de lo posible, dichas características, o a que los depositen en la forma y lugar adecuados.

En los casos regulados en este apartado, así como cuando se trate de residuos urbanos distintos a los generados en los domicilios particulares, las entidades locales competentes, por motivos justificados, podrán obligar a los poseedores a gestionarles por si mismos.

3) Los municipios con una población superior a 5.000 habitantes estarán obligados a implantar sistemas de recogida selectiva de residuos urbanos que posibiliten su reciclado u otras formas de valorización. No obstante, en materia de residuos de envases se estará a lo dispuesto en la normativa específica correspondiente.

Artículo 33. Responsabilidad administrativa

A efecto de lo establecido en este título, los residuos tendrán siempre un titular responsable, cualidad que corresponderá al productor, poseedor, o gestor de los mismos.

- Solo quedaran exentos de responsabilidad administrativa quienes cedan los residuos a gestores autorizados para realizar las operaciones que componen la gestión de los residuos, y siempre que la entrega de los mismos se realice cumpliendo con los requisitos establecidos en esta Ley y sus normas de desarrollo, así como los que establezcan, en su caso, las normas adicionales de la respectiva Comunidad Autónoma. En todo caso, la cesión ha de constar en documento fehaciente.
- Igualmente los poseedores de residuos urbanos quedarán exentos de responsabilidad por los daños que puedan derivarse de tales residuos, siempre que los hayan entregado a las Entidades locales observando las respectivas ordenanzas y demás normativa aplicable.

1.6. LEY DE ENVASES Y RESIDUOS DE ENVASES. LEY 11/1997

La directiva comunitaria sobre la gestión de envases y de residuos de envases y embalajes (Directiva 94/62/CE sobre Residuos de Envases y Embalajes)

no es, en puridad, una ley medioambiental ya que, tanto por su origen, deriva de una ley de comercio y transporte, como por la cantidad y complejidad de los agentes económicos implicados obedece tanto a razones comerciales como ambientales. La UE genera envases y embalajes en sus distintos estados miembros y, debido a las leyes de libre circulación de mercancías, los materiales pueden devenir residuos en un estado diferente al que se envasó. Ello obliga a realizar unas leyes de carácter armonizador que necesariamente han de conjugar los aspectos comerciales y económicos con las crecientes prioridades de carácter ambiental.

Esta dualidad comercial y ambiental atrapa a la ley en ciertas contradicciones como cuando afirma que los envases no podrán ir al vertedero y prohíbe la inscripción de desechable en el envase (aspecto ambiental) mientras que pone un techo del 65% a la cantidad de envases a recuperar (concesión comercial).

La ley española obliga a aplicar el sistema de devolución y retorno. En síntesis el sistema consiste en que los envasadores ponen los productos en el mercado y éste los vende al consumidor final. Una vez se ha generado el residuo se devuelven al comerciante. Estos retornan el envase vacío al envasador y cobran una cantidad. Se trata de un sistema poco ágil en el que el cupo de retorno de envases la fija el Ministerio de Medio Ambiente (aspecto ambiental) mientras permite que los agentes (envasadores, importadores y comerciantes) se acojan voluntariamente a uno de los sistemas de gestión integrado (concesión comercial. Esta alternativa podría tener una lectura en clave de pago por servicio prestado sin tener en cuenta el espíritu de la ley: «pago el punto verde y abandono el envase ya que para esto existe el sistema integrado de gestión»).

La ley española preconiza la aplicación de los análisis de ciclo de vida como herramienta para dilucidar la bondad ecológica de un determinado tipo de envase o embalaje.

Además la ley española introduce algunas mejoras de indudable valor ambiental en la trascripción de la directiva, como la reducción en el peso de los envases (aspecto ambiental) no obstante se muestra ambigua en la fijación de los límites temporales de cuando empieza a contar la reducción, o si la lógica reducción de peso que las empresas llevan a cabo por razones de economía entra o no en este concepto.

La ley es extensiva a todo tipo de envases ya sean de postconsumo como industriales y distingue entre:

- *Envase primario:* O el que se halla en contacto directo con el producto. El envase primario (*primary packaging*), contenedor interior (*inner container*) o primer contenedor (*first container*) es pues, aquel que está directamente en contacto con el producto. Contiene el producto, y además lo protege.
- *Envase secundario:* El que protege o engloba las unidades simples de producto. Habitualmente se desecha cuando se utiliza el producto o cuando se almacena de forma particular. Por ejemplo, la caja de cartón de una pasta de dientes (es un envase secundario que contiene un envase primario), o bien la caja de cartón con tres latas de conserva (un envase secundario que contiene, en este caso, tres envases primarios).
- *Envase terciario:* O el preciso para el transporte. Es el agrupamiento de envases primarios o secundarios en un contenedor que los unifica y protege a lo largo del proceso de distribución comercial.

1.6.1. El punto verde

El espíritu de la directiva Europea deja en libertad a los estados miembros para que elijan entre los tres instrumentos de gestión, o bien una mezcla de ellos:

- El punto verde.
- Los depósitos-consigna.
- Las ecotasas.

El punto verde: Nace en Alemania el 12 de junio de 1991 la Ordenanza de Minimización de Residuos de Envases y Embalajes (*Verpackungsverordnung*), como primer sistema integrado de gestión de residuos, pilotado por la sociedad privada «Duales System Deutschland» (DSD). La identificación de los envases con un punto verde «*Grüner punkt*» indica que estos serán reciclados. La DSD se encarga de la organización de la recogida, selección y valorización de los envases y residuos comerciales. La «dualidad» estriba en que el sistema funcionará con independencia de la recogida ordinaria de los ayuntamientos.

El sistema francés «Eco-Emballages» persigue los mismos fines que el anterior aunque con claras diferencias entre las que hay que resaltar:

- No hay obligación de reciclar.
- El sistema paga a los Entes Locales el sobrecoste de la recogida selectiva.

Desde el año 1992, la ley postula que se identifiquen los envases de acuerdo con lo indicado en la Tabla 11.2.

Tabla 11.2. Identificación de envases para el punto verde

SISTEMA DE IDENTIFICACIÓN (de carácter voluntario)					
Material	**Abreviatura**	**Numeración**	**Material**	**Abreviatura**	**Numeración**
Plásticos			**Madera**		
Tereftalato de polietileno	PET	1	Madera	FOR	50
Polietileno de alta densidad	HDPE	2	Corcho	FOR	51-59
Policloruro de vinilo	PVC	3	**Textil**		
Polietileno de baja densidad	LDPE	4	Algodón	TEX	60
Polipropileno	PP	5	Yute	TEX	61-69
Poliestireno	PS	6-19	**Vidrio**		
Papel y cartón			Vidrio incoloro	GL	70
Cartón corrugado	PAP	20	Vidrio verde	GL	71
Cartón no corrugado	PAP	21	Vidrio marrón	GL	72-79
Papel	PAP	22-39			
Metales					
Acero	FE	40			
Aluminio	ALU	41-49			

En general, transcurridos los primeros años de funcionamiento del punto verde se desprende que en los países donde se ha elegido el sistema dual: Alemania y Austria el coste del tratamiento es mucho más elevado. Contrasta el caso de Francia donde, desde el inicio se apostó por la valorización energética para no gravar el precio de venta de los alimentos.

El depósito-consigna: La consiga de envases es un sistema tradicional en Europa. En la mayor parte de los países fue substituido por el «envase no retornable». Donde más se usa es en Dinamarca y para algún tipo de envase en otros países.

Las ecotasas: El concepto de ecotasa se aplica en forma de gravamen extraordinario y específico a ciertos materiales o productos y tiene como finalidad potenciar el reciclaje y la reutilización. Así en Finlandia se aplica a las botellas de agua (0,70 € por envase), cuando el material del envase es reciclable es de 17 céntimos de € y queda suprimida si el material es rellenable (reutilización al menos 7 veces).

Ecoembes, nueva denominación de Ecoembalajes España SA, sociedad constituida en Noviembre de 1996 al objeto de poner en marcha un sistema de gestión de residuos de envases y embalajes, tiene un capital social formado por empresas envasadoras (55%), distribución y fabricantes de envases (20%) y recicladores de envases y empresas de limpieza (5%). Es una sociedad sin ánimo de lucro y hace público cada año su memoria de actividad de gestión.

1.6.2. Tarifas y repercusiones del punto verde

En España, las tarifas del punto verde propuestas para el 2006 son las indicadas en la Tabla 11.3.

Los costes más elevados corresponderán al plástico y a los envases compuestos. La Tabla 11.4 reproduce unos ejemplos de ello y en la última columna se aprecia la incidencia que la puesta en marcha del punto verde tiene en el precio de venta al público del producto.

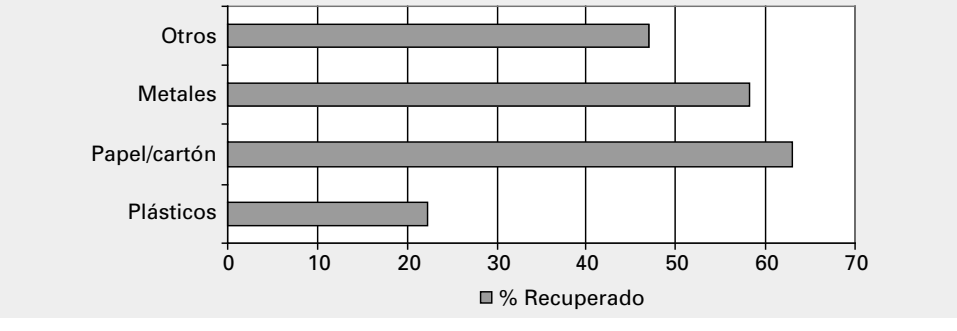


Figura 11.8. % de envases reciclados en 2004.

Tabla 11.3. Tarifas punto verde en España en 2004.

Tipo de envase	Céntimos €/kg
Acero	5,9
Aluminio	10,2
Plástico (PET y HDPE) rígido	24,7
Plásticos flexibles y resto	28,0
Cartón bebidas	21,2
Papel y cartón	5,1
Cerámica	1,8
Madera y corcho	1,9
Vidrio. Envase < 125 ml	0,29
Vidrio. Envase > 125 ml	0,39
Vidrio. Envase < 500 ml	0,39
Vidrio. Envase > 500 ml	0,78

Tabla 11.4. Repercusión del punto verde sobre los envases

Envase	Material	Peso (g)	Coste punto verde (Cent. €/kg)	Repercusión Cent. €/unidad
Agua mineral 1,5 l	Plástico PVC	50	19,1	0,95
Yogur 125 cc	Plástico PET	5,1	19,1	0,10
Leche 1l	Compuesto	27	15,6	0,42
Refresco 33 cl	Aluminio	16	8,1	0,13
Lata cerveza 33 cl	Acero	34	5,1	0,17
Detergente 3,5 kg	Cartón	320	5,1	1,63
Vino 75 cl	Vidrio	290	0,29	0,08

1.6.3. Resultados de la aplicación del punto verde

Según las estadísticas oficiales publicadas por *Ecoembes* en 2004, la cantidad de material recuperado en 2004 fue de 1.177.434 toneladas y las tasas de recuperación de envases aparecen en el gráfico de la Figura 11.8. Destaca el bajo porcentaje de recuperación de los residuos de envases de plástico.

La Figura 11.9 es complementaria a la anterior y, en una visión retrospectiva hasta el 2001, reproduce la cantidad de envases que se reciclaron (891.422 t/año) y las que se valorizaron energéticamente (286.012 t/año). Es decir, un 75,7% de los envases recuperados se recicló, mientras el 24,3% de valorizó energéticamente.

Estos resultados, con ser importantes (superan los objetivos marcados por la Ley de Envases 2004/12/CE para finales de 2008) contrastan con la realidad de las cifras globales. En España, y a grandes cifras, en el año 2004 se generaron 26.000.000 de toneladas de RSU, de los que, aproximadamente, el 50% eran envases y embalajes, o sea 13.000.000 t. Sí de ellos se recuperaron 1.177.434 toneladas, cabe deducir que la tasa de recogida selectiva de envases y embalajes es del orden del 9%.

Es obvio que la implantación de la recogida selectiva es dispar a lo largo de la geografía española pero, según los datos de la memoria de *Ecoembes*:

- La recogida de envases ligeros abarca el 88% de los municipios de más de 5.000 habitantes y el 95% disponen de recogida de papel y cartón.
- En términos de población ello supone el 94% de la población (37.000.000 habitantes) en el caso de envases ligeros y del 99% (40.600.000) en el caso del papel y cartón (haciendo referencia a la población residente en municipios de mas de 5.000 habitantes).

En el DVD adjunto, en el punto 4, se reproduce el RD 782/1998 relativo a la Ley de Envases y Embalajes.

1.7. PRINCIPALES NORMAS RELATIVAS A LOS RSU

A titulo de resumen la Tabla 11.5 sintetiza la legislación más importante relacionada con la gestión de los residuos.

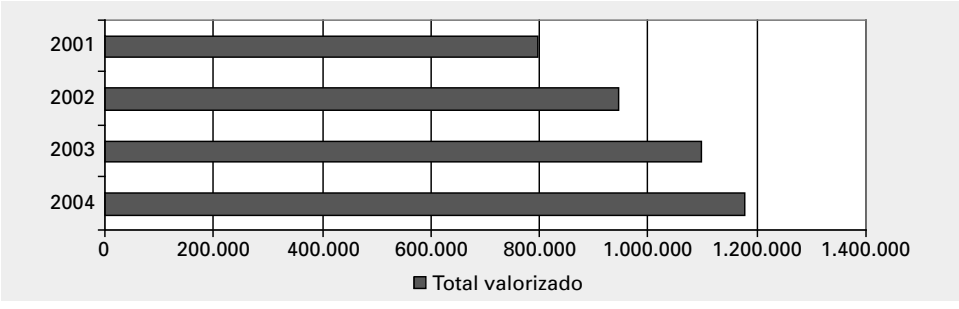


Figura 11.9. Cantidad de envases valorizados (t/año).

Tabla 11.5. Principales normas relativas a los residuos

Contenido	Unión Europea	Estado español
Residuos	Directiva 91/156/CEE, del Consejo, de 18 de marzo de 199, por la que se modifica la Directiva 75/442/CEE, del Consejo, de 15 de julio de 1975, relativa a los residuos (D.O.C.E., serie L, núm. 78, de 26/3/1991).	*Normas generales:* 1/ Ley 10/1998, de 21 de abril, de residuos B.O.E. núm. 96 de 22/4/1998). 2/ Real Decreto 9/2005, de 14 de enero, por el que se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados (B.O.E., núm. 15, de 18/1/2005). *Planes y programas:* 1/ Plan Nacional de Residuos Urbanos, 2000-2006, aprobado mediante Resolución de 13 de Enero de 2000.
Envases	1/ Directiva 2004/12/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 11 de febrero, por la que se modifica la Directiva 94/62/CE relativa a los envases y residuos de envases (D.O.U.E. serie L, núm. 47, de 18/2/2004). 2/ Directiva 94/62/CE relativa a los envases y residuos de envases (D.O.U.E. serie L, n.º 365, de 31/12/1994)	1/ Ley 11/1997, de 24 de abril, de envases y residuos de envases (B.O.E. núm. 99 de 25/4/1997). 2/ Real Decreto 782/1998, por el que se aprueba el Reglamento para el desarrollo de la Ley de envases (B.O.E. núm. 104 de 1/5/1998).
Vertederos	1/ Decisión del Consejo de 19 de diciembre de 2002 por la que se establece los criterios y procedimientos de admisión de residuos en los vertederos con arreglo al artículo 16 y al anexo II de la Directiva 1999/31/CEE (D.O.U.E. serie L núm. 11/27 de 16/1/2003). 2/ Directiva 1999/31/CEE, de 26 de abril, relativa al vertido de residuos (D.O.U.E. serie L, núm. 181/1 de 16/7/1999).	Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero (B.O.E. núm. 25 de 29/1/2002).
Incineración	Directiva 2000/76/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 4 de diciembre, relativa a la incineración de residuos (D.O.U.E. serie L, núm. 332/91, de 28/12/2000).	Real Decreto 653/2003, de 30 de mayo, sobre incineración de residuos (B.O.O. núm. 142, de 14/6/2003).
Prevención y control integrado de la contaminación	Directiva 96/61/CE del Consejo, de 24 de septiembre de 1996, relativa a la prevención y al control integrado de la contaminación (IPPC).	Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación (B.O.E. núm. 157, de 2/7/2002).

La citada información legislativa puede ampliarse en la siguiente web: http:/www.miliarium.com/Proyectos/Vertederos/PlanesResiduos.asp#PNRU

2. Composición y evolución de los RSU

Pese a la abundante normativa existente es difícil identificar los RSU bien clasificados para poder compararlos con el de otras comunidades o países. Por este motivo, en este apartado se intenta clarificar las definiciones y explicar como es la composición de los mismos y de que manera evoluciona la cantidad y la caracterización de los RSU.

A escala internacional existe una clara tendencia al incremento de los RSU, como sería el caso de Norteamérica, otros con una tendencia a la estabilización de la generación como los países europeos y otros que encontrándose en una etapa de desarrollo incipiente generan poco pero les espera un largo camino en el que incrementarán la producción de RSU. Los datos de la Figura 11.10 son bien ilustrativos.

2.1. EL ORIGEN DE LOS RESIDUOS URBANOS

Como sea que la producción de RSU va íntimamente ligada a la población urbana, se ha elegido el municipio de Madrid ya que constituye la mayor concentración urbana de España. La ciudad, en sí misma, tiene más de tres millones de habitantes a los que habría de sumar la población flotante y los turistas.

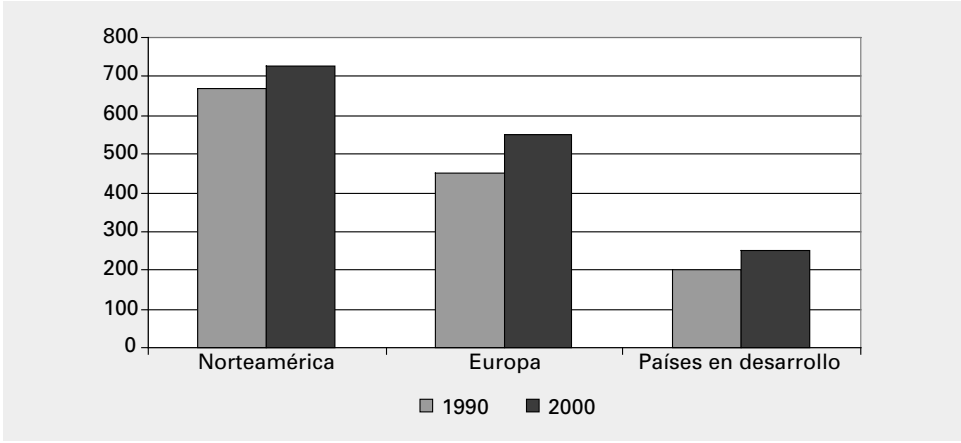


Figura 11.10. Tendencias en la generación de los RSU (kg/habitante y año).

La ciudad de Madrid, en el año 2000, generó 1.470.831 toneladas de residuos sólidos urbanos, lo que supone una tasa de 490 kg/año y habitante (equivalente a 1,34 kg/habitante y día), es decir una cifra perfectamente homologable con las del resto de capitales europeas. Cerca del 90% de estos residuos se califican como de origen domiciliario, es decir, los que se generan en los domicilios (propiamente RSU), oficinas y establecimientos comerciales de la ciudad, y los que se depositan en los contenedores (recogida selectiva). La Figura 11.11 muestra el origen.

La producción de residuos domiciliaros viene creciendo en los últimos años de manera ininterrumpida, situación que contrasta con el descenso de población del municipio de Madrid. Ello se asocia a factores tales como la elevación del nivel de vida, a mayor renta disponible mayor generación de RSU, al incremento de la actividad comercial y al cambio de hábitos de consumo. En la actualidad, 2006, la tasa se acerca o sobrepasa ligeramente los 1,6 kg/habitante y día, o sea 585 kg/habitante y año.

2.1.1. Composición media de los RSU domiciliarios

Siguiendo con la ciudad de Madrid, la composición media de los residuos urbanos domiciliarios en el periodo 1996-2000, fue la indicada en la Tabla 11.6 (En la misma tabla se incluye la composición media correspondiente al estado español, según fuente del Ministerio de Medio Ambiente, para 1999).

Si bien en periodo de tiempo al que hace referencia la Tabla 11.6, la recogida selectiva no estaba ampliamente extendida, no deja de ser lamentable de que las principales partidas en los RSU sean, precisamente de materiales reciclables. Por otra parte, en la actualidad la recogida selectiva ha aumentado mucho pero, la generación también con lo que el resultado final vuelve a estar más o menos en el mismo sitio. También hay que hacer notar la falta de homogeneidad en los criterios de identificación de las diversas fracciones.

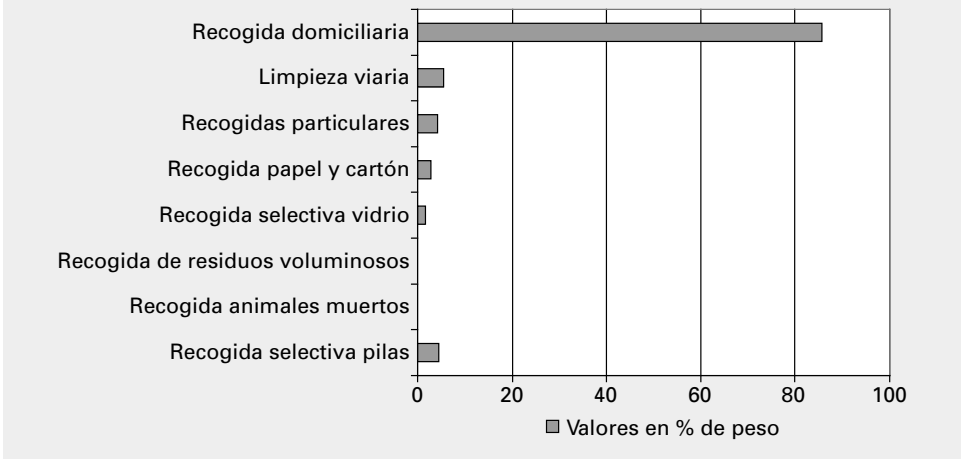


Figura 11.11. Origen de los residuos sólidos.

Tabla 11.6. Composición media de los RSU de Madrid

Componente	% en peso (Madrid)	% en peso (Nacional)
Fracción fermentable	51,5	48,9
Papel y cartón	21,9	18,5
Plásticos	11,0	11,7
Vidrio	6,4	7,6
Metales	3,5	4,1
Tierras	0,9	—
Textiles, complejos y celulosa	—	5,7
Goma y cuero	0,7	—
Madera	0,6	0,6
Otros	3,5	2,9

En la Tabla 11.7 se expone la caracterización del RSU del Área Metropolitana de Barcelona en 2004. Hay que destacar la tendencia universal en la que a medida que aumenta el poder adquisitivo, se reduce la cantidad de material fermentable y aumenta la de envases.

Tabla 11.7. Composición media de los RSU de Barcelona

Componente	% en peso
Fracción fermentable	36,8
Papel y cartón	33,6
Plásticos	11,1
Vidrio	4,2
Metales	1,7
Tierras	0,8
Goma y cuero	0,0
Madera	3,5
Otros	8,3

Por otra parte, como también se ha indicado, la cantidad absoluta de RSU va en aumento. Ello indica que, si bien los porcentajes de fermentable disminuyen, al aumentar la producción, el valor absoluto vuelve a quedar prácticamente igual. Es decir, al alcanzar cierto grado de desarrollo económico, la cifra de material fermentable se estabiliza.

2.1.2. Particularidades en la generación de los RSU

La generación de RSU varía mucho en función de una serie de parámetros, algunos de los cuales se analizan en este apartado.

La Tabla 11.8 muestra, para un mismo país (en este caso el Reino Unido) como puede variar la generación en función de la concentración urbana.

Tabla 11.8. Generación de RSU y población

Población) (habitantes	kg RSU/ persona y día	kg RSU/ persona y año
< 2.500	0,91	332
2.500-10.000	1,22	445
10.000-30.000	1,45	529
> 30.000	1,63	595

La Tabla 11.8 muestra que existe una clara correlación entre la densidad de población y la producción de residuos urbanos. Como sea que en la UE la tendencia al crecimiento de la población urbana va en aumento en detrimento de la rural, es fácil predecir que la generación de RSU también aumentará (las estadísticas confirman este extremo).

También existe una varianza en la caracterización según sea clima cálido, verano, o invierno. En España es habitual que en verano se incremente la fracción fermentable como consecuencia del mayor consumo de frutas, debido al calor y, obviamente se generan más cáscaras. Sin embargo estas diferencias se van reduciendo con el tiempo. El factor turismo, muy importante en España, conduce a que los envases aumenten en verano.

La relación entre el aumento de la generación de RSU, el incremento del PIB (Producto Interior Bruto) y la población, se establece, para el periodo 1990-2000, en la Tabla 11.9 (fuente OECD)

Tabla 11.9. Relación entre generación de RSU, PIB y población

	Generación RSU, aumento en %	PIB, aumento en %	Población, aumento en %
Norteamérica	13	37	10
UE (15)	26	23	3
Región Asia-Pacífico	11	25	5

Es difícil, en primera lectura extraer resultados de la Tabla 11.9. Comparando EE UU y la UE, se cumple el principio de que al aumentar el PIB se incrementan los residuos *per capita*. Sin embargo, la tabla indica que la relación se halla invertida, es decir quien mas aumenta el PIB, menos incrementa los RSU. La explicación estriba en que los EE UU partían de una generación unitaria de RSU mucho más elevada que la UE.

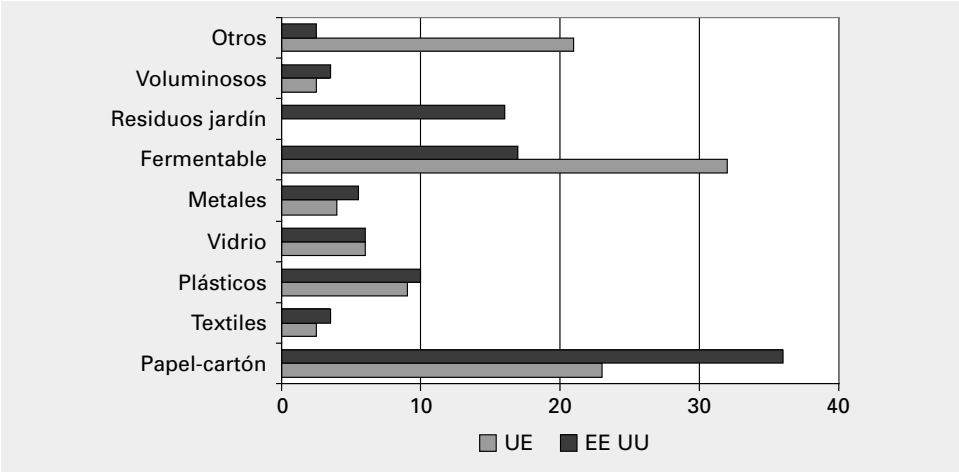


Figura 11.12. Comparación composición RSU entre EE UU y la UE.

Siguiendo con la comparación entre los EE UU y la UE, ya que se trata de sociedades homologables por sus hábitos, cultura y nivel de renta, la Figura 11.12 introduce un nuevo factor de interés, al comparar (en porcentajes) la caracterización media de los RSU.

En la introducción de este apartado se hacía mención a que la falta de definiciones claras conduce a errores. Un caso bien ilustrativo lo constituye la Figura 11.12. A primera vista parece que la cantidad de fermentables en los EE UU, aproximadamente el 17%, es muy pequeño en comparación con el 32% de la UE. No obstante, si se tiene en cuenta que la cifra media de generación en EE UU es de 720 kg/persona y año, la cantidad de fermentables sería de 122 kg/persona y año, mientras que en la UE la cifra oscilaría alrededor de los 176 kg/persona y año. En valor absoluto la diferencia es de 54 kg/persona y año, una explicación consiste que en Europa los restos de jardín se incluyen en los fermentables (residuos orgánicos). Sin embargo existe otro factor distorsionador. En los EE UU se tiende mucho a comprar alimentos precocinados, lo que hace disminuir la cantidad de fermentables en el hogar pero aumenta la cantidad de envases, puesto que los alimentos deben estar muy bien envasados.

Conviene también insistir en que, si bien todos los residuos domiciliarios caben, según la ley, en el mismo epígrafe, la caracterización, como muestra la Tabla 11.10 es bien diferente según la procedencia.

Tabla 11.10. Caracterización del RSU según procedencia

Residuo	Vivienda familiar	Hotel	Escuela	Oficina	Tiendas comerciales
Papel mezclado	10,3	11,3	28,6	43,0	11,8
Periódicos, revistas	33,7	11,5	2,5	3,5	6,7
Cartón	10,0	27,5	26,1	21,5	37,4
Plásticos	8,6	13,7	6,9	3,7	8,0
Maderas	1,7	0,7	0,1	8,5	3,6
Restos de jardín	5,3	0,5	0,0	0,0	2,8
Restos comida	13,0	4,9	6,7	2,2	12,4
Otros orgánicos	7,4	7,5	0,1	1,2	1,5
Acero	2,5	6,9	8,2	0,6	3,6
Aluminio	1,1	2,7	1,5	0,4	0,7
Vidrio	5,9	11,9	6,2	0,8	2,7
Otros inertes	0,3	0,9	13,1	14,6	8,6

2.1.3. La densidad de los RSU

La densidad es un parámetro fundamental y tiene una gran influencia en los sistemas de recogida y transporte de los RSU. La densidad aparente de los RSU estándar oscila de 200 a 300 kg/m^3, mientras que en el caso de los camiones de recogida puede oscilar de 250 a 350 kg/m^3.

La densidad aparente, en masa, de las fracciones que componen los RSU es fundamental para establecer los sistemas de clasificación y separación. La Tabla 11.11 lista las densidades aparentes de los principales componentes de los RSU.

En el DVD adjunto, en el punto 5, se muestra diversa información sobre sistemas de trituración y proceso de los RSU. Diagramas de proceso de materiales reciclados

Tabla 11.11. Densidad aparente de las fracciones de los RSU

Fracción	kg/m³	Densidad aparente (kg/m³), según tamaño			
		<100 mm	<50 mm	<10 mm	<5 mm
RSU	150-250	200	250	300	325
Papel/cartón	700 -1.100	30	40	55	60
Fermentables	800-1050	275	300	350	375
Plásticos densos	800-2.200	300	325	375	390
Plásticos ligeros	800-2.200	20	50	80	100
Metales férreos	7.900	200	300	500	1.000
Metales no férreos	2.700	100	150	200	300
Textiles	900-1.100	150	200	275	300
Maderas	400-1.300	150	175	225	300
Vidrio	2.400-2.600	500	700	1.500	1.800
Cenizas	1.200				
Tierras	1.600				
Polvo	300				
Deyecciones animales	940				
Aceites vegetales	930				
Aceites minerales	900				
Residuos de animales	500-2.000				

2.2. PRODUCCIÓN DE RSU POR COMUNIDADES

La Figura 11.13 muestra los RSU generados por las Comunidades Autónomas españolas, en t/año, durante 2002.

La cifra total generada fue de 24.015.152 t, lo que supone una ratio de 570 kg/habitante y día. Si bien la población española aumentó mucho desde el 2002 al 2005, la generación de RSU también lo hizo pero en un porcentaje mayor, puesto que en 2001 para una población oficial de 40.837.371 (fuente INE), la cifra de RSU estimada fue de 19.124.750 toneladas. La Tabla 11.12 muestra la generación de RSU por comunidades.

2.3. LA NATURALEZA DE LOS COMPONENTES DE LOS RSU

La parte más importante, desde el punto de vista ambiental, de los RSU en todo el mundo es la fracción fermentable, seguida de los envases. Es necesario conocer algo de su caracterización de cara a su reciclaje.

Las actividades de valorización para volver a dar valor a un producto desechado pueden ser de tres tipos:

- *Reutilización.* Es aplicable sólo a productos de uso. Como su propio nombre indica, consiste

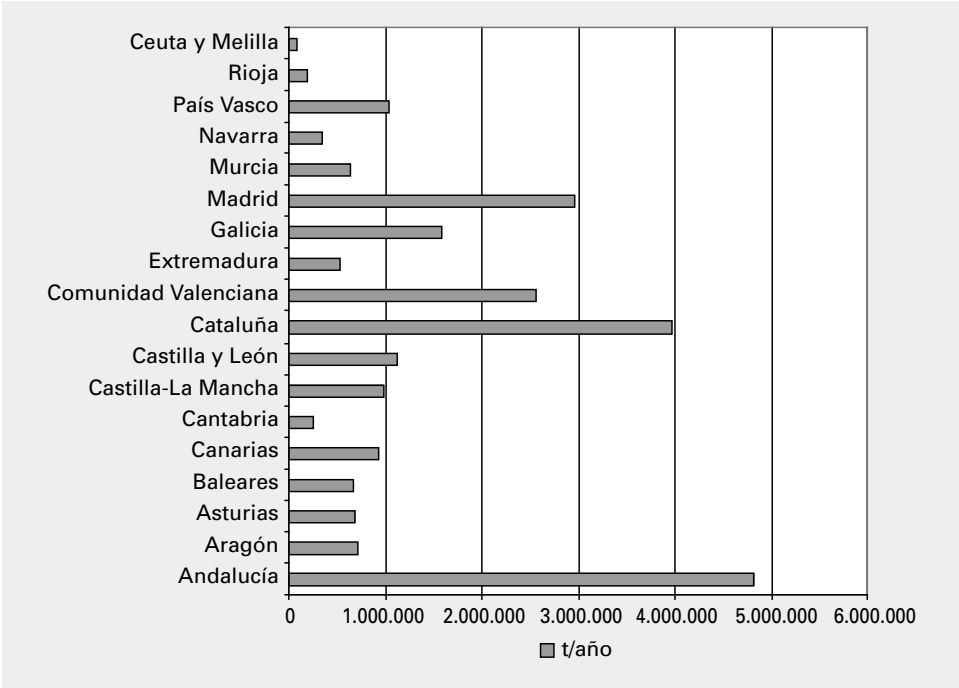


Figura 11.13. Cantidad de RSU generado por las Comunidades Autónomas.

Tabla 11.12. Producción unitaria de RSU por Comunidades Autónomas

Comunidad	kg/habitante y año	Comunidad	kg/habitante y año
Andalucía	452	C. Valenciana	511
Aragón	395	Extremadura	392
Asturias	442	Galicia	322
Baleares	762	Madrid	490
Canarias	693	Murcia	401
Cantabria	448	Navarra	439
Castilla-La Mancha	357	País Vasco	411
Castilla y León	384	La Rioja	448
Cataluña	531	Ceuta	438

en una nueva utilización del producto desechado, ya sea directamente, o bien previas operaciones de mantenimiento y/o transporte. Un ejemplo sería el lavado de un envase de vidrio para reusarlo para el mismo fin.

- *Reciclado.* Es aplicable a todo tipo de residuos de productos materiales, cuando no es posible reutilizar el producto como tal. Consiste en la reutilización de sus componentes o de sus materias primas para entrar en el ciclo de la vida del mismo producto o de otros productos genéricos. Un ejemplo es la conversión de la fracción fermentable en compost.
- *Valorización energética.* Es aplicable a todo residuo de naturaleza orgánica. Cuando no es posible aprovechar los materiales del producto en sí (por razones técnicas, económicas o de otro tipo), intervienen estas actividades consistentes en aprovechar, al menos, su contenido energético.

2.3.1. La fracción fermentable

Las autoridades ambientales han puesto un gran empeño en encontrar soluciones para esta fracción puesto que, una vez en el vertedero su impacto es muy importante. La fracción orgánica supone, en peso, la parte mayoritaria de los RSU. Cuando de habla de fracción orgánica hay que pensar en los restos de comida (fermentable o putrescible), puesto que orgánicos también son el papel, plásticos, textil, etc.

La distribución típica de tamaño de los componentes presentes en los RSU indica que el componente mayoritario: la fracción orgánica fermentable tiene un tamaño relativamente pequeño, estando el valor medio en torno a los 8 cm., lo cual facilita su separación. No obstante ello entraña un inconveniente y es que otros materiales peligrosos (pilas) son también de pequeño y se mezclan.

Las posibilidades de recuperación y reciclaje de esta fracción se reducen a:

- *Compost*: Todos los sistemas de tratamiento de RSU comienzan por una segregación de los materiales reciclables y separación de los peligrosos. Su uso se va haciendo popular y las aplicaciones se van extendiendo: ciertos cultivos agrícolas, recuperación de suelos (muchos investigadores trabajan en estudios de recuperación de suelos degradados a partir de compost de mas o menos buena calidad, para la instauración de vegetación autóctona), jardinería,... La calidad del compost va directamente ligada a la recogida selectiva de la fracción fermentable. Esta alternativa hay que ir tomándola en consideración por cuanto algunos países de la UE no permiten el vertido de RSU con contenidos de fracción putrescibles superiores al 5%.
- *Biogás:* Ya sea el generado en los vertederos o bien el producido en reactores anaerobios.
- *Fabricación de productos químicos:* Por ejemplo el papel recogido en origen se reduce a sus componentes básicos (celulosa, hemicelulosa, lignina, etc.) y se fabrica etanol.
- *Combustible:* Una vez seco, o parcialmente seco puesto que la fracción orgánica tiene un PCI muy elevado. En este sentido es interesante conocer el programa «Biomasa Nipón» que consiste en una estrategia, que se aplicará a partir de 2010, para extraer energía (electricidad, pelets de combustibles y etanol) a partir de residuos ya sean de deyecciones de animales o residuos agrícolas, RSU, etc.

Los diversos estudios encaminados a controlar la calidad de la recogida selectiva de la fracción fermentable en Cataluña, realizados en 2003, concluyen que existe un promedio del 10% de impropios (los valores máximos son del 15%), lo que hace inviable un compost de cierta calidad a la vez que complica o, a veces, invalida el proceso de mecanización. Los impropios, por orden de importancia están constituidos por plástico, papel, vidrio y metal. Es decir, los componentes de los RSU. La Tabla 11.13 resume la caracterización media de estos resultados.

Tabla 11.13. Porcentajes de fracciones fermentables de recogida selectiva

Material	% Peso	% Volumen
Residuos de cocina	71,4	44,3
Residuos verdes	18,2	22,9
Total FORM	**89,6**	**67,2**
Impropios	10,4	32,8

Otro estudio, realizado para el Gobierno Catalán ha detectado una media de impropios del 14,1% (sobre un total de 621 muestras) sobre la FORM (Fracción Orgánica de los Residuos Municipales).

En los últimos años casi todas las ciudades del mundo, que tienen mas o menos el mismo problema, han iniciado programas para reducir al mínimo el problema de la fracción fermentable, por ejemplo la ciudad de Bristol (Reino Unido) con el denominado «Proyecto piloto sobre compostaje casero».

2.3.2. Papel y cartón

En los últimos años y gracias especialmente a las campañas de educación ambiental y a la colocación de contenedores de recogida selectiva, las tasas de reciclaje y recuperación de papel se han disparado.

Así, según datos de ASPAPEL (Asociación de Papeleros Españoles), en el año 2001 para una producción de papel de 5.132.200 toneladas de papel nuevo, se utilizaron como materia prima 4.196.900 toneladas de reciclado, lo que representa una tasa del 81,7%.

En la actualidad se recupera para su reciclaje el 54,6% de papel y el cartón consumido en España, lo que lo sitúa ligeramente por encima de la media Europea (52%) pero todavía lejos de Alemania (69,8%) o Austria (65,8%).

La recogida selectiva juega un papel fundamental ya que el papel que ha estado en contacto con la materia fermentable no es válido para el reciclaje. Existen otros tipos de papel que no se pueden reciclar: Papel térmico de fax, copiativo, papel encolado, papel encerado, platos y vasos de papel.

La gráfica de la Figura 11.14 muestra (en miles de toneladas) las tasas de utilización, reciclaje y recogida de papel.

Según datos extraídos del PNRU (Plan Nacional de Residuos Urbanos 2000-2006 propuesto por el MIMAM (Ministerio de Medio Ambiente) en 1997, las cifras arrojaron una tasa de recuperación del 42,1% y 2.354.000 toneladas recicladas, manteniéndose los resultados obtenidos en la última década.

A partir de 2001, la capacidad de reciclado de las fábricas españolas ha crecido por encima de la recuperación (un 8,3 en 2001 y un 4,1% en 2002), lo que ha llevado a una diferencia entre lo recuperado y lo que es capaz de reciclar que ha llegado a máximos históricos. Lamentablemente, concluye un estudio de ASPAPEL y REPACAR, cerca de dos millones de toneladas de papel y cartón siguen yendo a los vertederos. En el año 2003, España tuvo que importar 900.000 t de papel usado. En resumen: la implantación municipal de la recogida selectiva avanza y permite recuperar el 50% del papel usado, mientras la industria debe importar el 20%.

2.3.3. Los plásticos

Existen en el mercado más de 50 tipos de plásticos diferentes de donde es fácil deducir que ello constituye un grave problema a la hora del reciclado.

En España el 66% del plástico reciclado tiene origen industrial, siguiéndole el sector agrícola con un 18%, doméstico (7%) y automoción (2%). El polietileno, tanto de alta como de baja densidad es el compuesto que más se recicla, seguido del PVC.

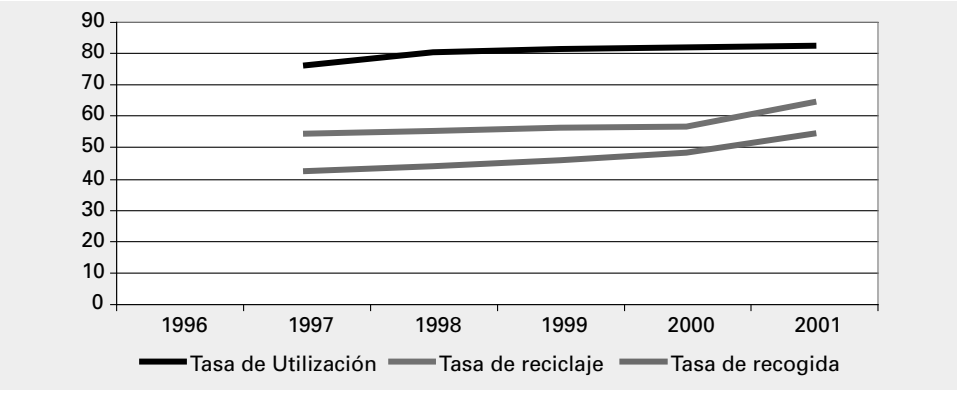


Figura 11.14. Eficiencia de la recogida y reciclaje del papel en España.

En 1996 se consumieron unas 1.112.000 toneladas de plástico para envase y embalaje, con el balance de recuperación que muestra la Tabla 11.14.

Tabla 11.14. Estimación de envases y embalajes de plásticos valorizados

Estimación de los envases y embalajes de plástico valorizados en España (1996)	
Consumo plásticos envases (t/año) A	1.112.000
Reciclaje (t/año) B	59.000
Valorización energética (t/año) C	43.000
Tasa de reciclaje (% B/A)	5,3
Tasa de valorización (% (B + C)/A)	9,2

Las posibilidades de recuperación y reciclaje tienen mucho a ver con la procedencia. Así, los plásticos de procedencia agrícola son muy difíciles de recoger y reciclar, en cambio los de origen industrial son más homogéneos.

La industria europea de plásticos encargó en 1999 un estudio de «Ecoeficiencia» de los plásticos al TNO (Instituto independiente de investigación alemán), sobre las posibilidades de optimizar la gestión de los residuos de plástico. El informe concluye que:

- *La situación actual:* 15% de reciclaje (12% mecánico y 3% de reciclaje químico), 15% a recuperación energética y 70% a vertedero, dista mucho de ser la mejor.
- *La combinación:* 15% de reciclaje mecánico y 85% a recuperación energética sería el mejor escenario desde todos los puntos de vista.

Los análisis de ciclo de vida para diversas aplicaciones ponen de manifiesto resultados, a primera vista, sorprendentes. Así un estudio del Laboratorio de Modelización de la UPC (Universidad Politécnica de Cataluña), financiado por el Foro Ibérico del PVC, pone de manifiesto que las ventanas con carpintería de PVC aporta un ahorro energético, en calefacción, un 45% superior a las fabricadas en aluminio y un 15% con respecto a las de madera.

2.3.4. El vidrio

En el 2001, las industrias vidrieras de Europa reciclaron un total de 27.513 millones de envases de vidrio, siendo Suiza el país con el índice de reciclado más elevado (91%), seguido de Finlandia con un 89% y Suecia con un 86%. La media ponderada Europea alcanzó, en este año, el 63,7%.

Con un total de 1.522 millones de botellas y tarros reciclados, España obtuvo durante el mismo periodo de tiempo una tasa de reciclado del 31% de los envases utilizados. El Reino Unido un 29% y Grecia un 26%.

En cuanto a valores absolutos, Alemania se configura como el país con el mayor número de envases de vidrio reciclado y en el que sus ciudadanos colaboraron en la recuperación con 8.981 millones de envases de este tipo de material. Le sigue Francia con 6.171 millones de envases de vidrio e Italia con 3.092 millones.

El reciclaje de envases de vidrio en España alcanzó en 1996 una tasa de recuperación del 35%, con 456.000 toneladas recicladas, la cual se elevó al 37,3% en 1997.

Tabla 11.15. Reciclado de vidrio en España

Reciclaje de vidrio en España		
	Año 1996	**Año 1997**
Consumo (t/año) A	1.303.410	1.409.438
Vidrio reciclado (t/año) B = C + D	456.193	521.492
– Doméstico/Municipal C	220.446	249.866
– Otros domésticos D	235.747	271.626
Tasa de reciclaje (% B/A)	35,0	37,3

En España, la población atendida llegó a 35,4 millones de habitantes en el año 1997, con un parque de contenedores verdes para recogida de vidrio de 50.000 unidades, lo que supone un ratio de casi 800 habitantes/contenedor calculado sobre el total de la población nacional, o de 707 habitantes/contenedor en las zonas atendidas.

Según *Ecovidrio,* en 2003 los ciudadanos reciclaron un 10% más de vidrio hasta alcanzar un total de 435.318 t, lo que supone que cada ciudadano recicla anualmente 10 kg de envases de vidrio (la cifra mayor la encabeza el País Vasco con 20 kg, seguido por Baleares 18,7 y la Rioja 17 kg). Según la mencionada entidad el resultado se ha conseguido con un iglú (contenedor) por cada 500 habitantes.

Los datos sitúan a España en una tasa de reciclado del 38,3%, superior al de algunos estados europeos pero distante de los países centroeuropeos donde la tasa ronda el 85% (Alemania 87%, Austria 83%, Finlandia 92%, etc.).

En el DVD adjunto, en el punto 6, se muestra información sobre sistemas de clasificación de vidrio recuperado.

2.3.5. Los metales

Los metales son fáciles de recuperar en recogida selectiva, se recuperan en el contenedor de «envases ligeros», pero es el único componente que también se puede recuperar a partir del «todo uno» en las plantas de selección y triaje. En líneas generales, el porcentaje de botes de aluminio va tomando la delantera a los de hojalata.

2.3.5.1. Envases de acero

La recuperación de envases de acero ha experimentado un fuerte incremento en los últimos años, debido fundamentalmente a la entrada en funcionamiento de nuevas plantas de tratamiento de RSU (incineración y compostaje). Así, según datos de *Ecoacero*, en el año 1995 se recuperó el 17,4% de los envases de acero, pasando a un 23,2% en 1997. En la Tabla 11.16 se resume la situación de este sector.

Tabla 11.16. Reciclado de envases de acero en España

Recuperación de envases de acero en España		
	Año 1996	**Año 1997**
Consumo aparente (t/año) A	413.000	469.686
Acero transformado en envases (t/año) B	359.310	408.627
Envases en el mercado nacional (t/año) C	276.890	310.855
Envases recuperados D	54.997	72.250
Tasa de recuperación (% D/C)	19,9	23,2

Es preciso hacer unas anotaciones sobre los diversos tipos de acero que pueden presentarse en los residuos:

- *El acero galvanizado.* El zinc es uno de los metales más usados para la protección del acero. Así un vehículo contiene unos 10 kg de zinc recubriendo la chapa de acero. Gracias a ello, desde los años 80, se ha alargado en 14 años la vida útil del automóvil. En el proceso Waeltz el metal se volatiliza y se recupera.
- *El acero estañado.* La problemática es muy diferente ya que el estaño se difunde durante el proceso de fusión (reciclado del acero) y lo torna frágil. Este tipo de acero, de los más usados en la industria del envase, se destina a la fabricación del cobre. Investigadores de la Universidad de Leeds (Reino Unido) han descubierto que añadiendo aluminio a la mezcla se mejoran las propiedades. Todo ello supone un avance para la selección de los envases y una racionalización de su recogida.

2.3.5.2. Envases de aluminio

Desde el punto de vista del reciclaje el aluminio es, sin duda, el material más atractivo, puesto que además que permite ser reciclado de manera indefinida, la «energía contenida» (para lograr un kg de aluminio a partir de bauxita se precisa del orden de 70 Kw., mientras que partiendo de aluminio, la energía requerida es tan solo del 5% de aquella cifra) le confiere un gran valor económico. Los envases de aluminio se pueden clasificar en:

- Rígidos: (botes, latas de comida, aerosoles, etc.).
- Semirrígidos (bandejas).
- Flexibles (bolsas, sacos, etc.).

El consumo total de envases de aluminio fue, en 2000 en España, de 38.771 toneladas. De los 2.016 millones de botes de aluminio se reciclaron el 22,48%, lo que supone 6.254 toneladas, según datos de ARPAL (Asociación para el Reciclado de Productos de Aluminio).

Tabla 11.17. Reciclado de envases de aluminio en España

Recuperación de botes de aluminio en España (Millones de unidades)		
	Año 1997	**Año 2000**
Consumo total botes A	3.700	4.800
Botes de aluminio B	1.517 21.067 t/año	2.016 27.330 t/año
Botes de aluminio reciclados C	290 4.045 t/año	453 5.247 t/año
Tasa de reciclaje (% C/D)	19,0	22,4

La Tabla 11.18 expone las especificaciones preparadas por *Ecoembes* para lograr una correcta recuperación de los envases de aluminio.

Los estudios realizados por ARPAL y *Ecoembes* han revelado que el reciclado de envases de aluminio alcanzó el 25,6% en 2003, un total de 11.710 toneladas de envases de este material, un considerable incremento con respecto a años anteriores. La distribución por tipos de envases se muestra en la Tabla 11.19.

2.3.5.3. Nomenclator relativo a metales y su recuperación

Con el propósito de unificar la terminología empleada en la mayor parte de los gremios, el de Cataluña

Tabla 11.18. Especificaciones para el reciclado de artículos de aluminio

Material solicitado	Residuo conteniendo más del 85% (incluye humedad y restos) de envases de aluminio rígido o semirrígido.
Humedad	< 5%.
Impropios	Total de impropios < 15%. – Libre de metales férreos (0%). – Metales no férreos < 5%. – Impropios varios < 4% (plásticos, brics, papel etc., donde ninguna puede superar el 2%. Finos y otros < 6%.
Condiciones de entrega	Compactado en forma de paquetes o balas. Densidad aparente > 500 kg /m^3. Los paquetes deben resistir la manipulación industrial. Entrega mínima: – 5 t en plantas de < 3.000 t/año de tratamiento. – 10 t en plantas de > 3.000 t/año de tratamiento.

Tabla 11.19. Distribución de tipos de envases de aluminio recuperados

Tipo de envase	Toneladas/año 2003	%
Latas de bebida	3.188	78
Aerosoles	449	11
Latas de conservas	245	6
Cápsulas	123	3
Semirrígidos	82	2

(Gremi de Recuperació de Catalunya) propone lo siguiente:

- *Acero inoxidable chatarra, viruta:* Todo aquel acero inoxidable 18/8 con un mínimo del 7% de Ni y 16% de Cr y libres de otros metales, exceso de hierro, aceites y contaminantes.
- *Aleación:* Producto compuesto por dos o más elementos donde uno de los cuales, por lo menos, ha de ser metal.
- *Aluminio cacharro, chatarra:* Mezcla de aleaciones de aluminio pintado o no, recubierto de plástico (procedente de electrodomésticos) más o menos limpia. El total de hierro de debe ser superior al 2%.
- *Calamina chatarra:* Chatarra de piezas mixtas de Zn viejas fundidas a inyección, con o sin hierros y otros aditamentos extraños. Debe estar libre de virutas, espumas, plásticos, etc. También procede de tejados antiguos (En Cataluña se denomina Dalia).
- *Chatarra:* Se aplica a todo material en fragmentos resultante de la fabricación de un producto o de postconsumo.
- *Fragmentación:* Trituración de VFU (vehículos fuera de uso) una vez descontaminados.
- *Separador magnético:* Dispositivo equipado con un electroimán para separar la fracción magnética (hierro) de las demás.

2.3.6. Posibilidades de recogida selectiva

La recogida selectiva podría definirse como la operación previa a realizar para llevar a buen fin el reciclaje.

Un estudio llevado a cabo por las ACR (Asociación de Ciudades por el Reciclaje), con sede en Bruselas ha detectado que la media de generación de RSU en Europa es de 422 kg/persona año (año 2000), con una ligera mayoría de fermentable (hay que tener en cuenta que en muchas partes ya existe recogida selectiva).

La misma ACR estima que puede llegarse a una tasa de recuperación de fracciones de RSU de 200 kg/persona año. Según esta asociación, la recogida media de residuos reciclables, en kg/persona año, se muestra en la Tabla 11.20.

Según datos del Departament de Medi Ambient del Gobierno Catalán, en el año 2003, se generaron en Cataluña 3.770.921 t de RSU, lo que, en cifras oficiales corresponde a 1,61 kg/habitante y día. De estos, se recogieron selectivamente 720.451 t, que re-

Tabla 11.20. Posibilidades de la recogida selectiva en Europa

	Papel y cartón	Vidrio	Plásticos	Metales	Textiles	Mixtos secos	Orgánicos	Total
Media teórica de generación de residuos	109	30	38	17	21	—	122	422
Media	36	11	0,9	2,5	0,6	26	25	101
Máximo	84	31	6	13	4	120	72	166

Tabla 11.21. Materiales recogidos selectivamente en Cataluña

Material	t/año (2003)	Destino
Fermentable	150.128	Fabricación compost
Papel y cartón	145.722	Reciclaje
Vidrio	93.485	Reciclaje
Envases ligeros	49.280	Reciclaje
Voluminosos	109.394	Valorización y tratamiento
Poda y jardín	44.188	Fabricación compost
Pilas	502	Tratamiento
Textiles	3.252	Valorización y tratamiento
Puntos limpios	124.500	Valorización y tratamiento
TOTAL	**720.451**	

presenta un 19,1%. La Tabla 11.21, indica las cantidades de las fracciones recogidas selectivamente en toda Cataluña.

2.4. EVOLUCIÓN EN LA COMPOSICIÓN DE LOS RSU

La caracterización de los residuos urbanos depende de la renta disponible y de los hábitos de vida de los ciudadanos, de ahí las diferencias apreciables, principalmente en la generación total de residuos, a mayor renta per cápita más residuos por persona y día se generan. La Figura 11.15 indica la composición de los RSU de México y España, siendo la generación media actual:

- México: 0,9 kg/habitante y día.
- España: 1,6 kg/habitante y día.

De esta manera, en la hipótesis de que en México en 10 años se alcanzaran los 1,6 kg/h.d, la evolución de la composición, en g/día y siguiendo la evolución de diversos países europeos, sería la indicada en la Figura 11.16.

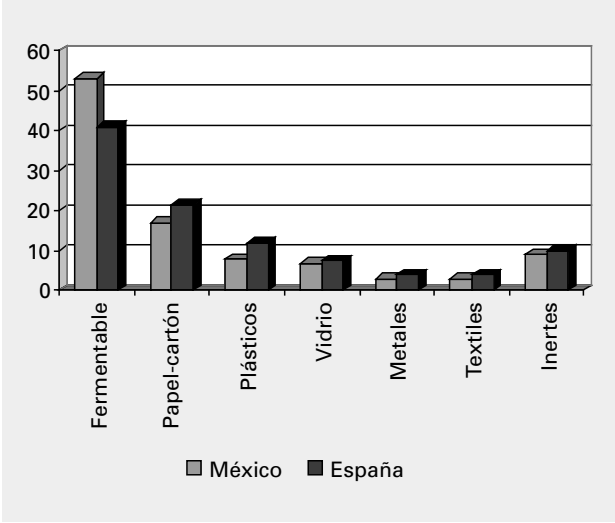


Figura 11.15. Comparación de composiciones (en %) de los residuos urbanos.

Es decir, la Figura 11.16 señala la tendencia en la composición de los RSU con el tiempo. A pesar de tratarse de un ejemplo teórico, las bases de cálculo se han extraído de valores reales acaecidos en Europa. Así, es significativo que en el decurso de los años, la cantidad de papel y cartón llega a superar la fracción fermentable.

Una conclusión adicional que se puede extraer de este ejercicio es la planificación de infraestructuras, para la gestión de los RSU, que deberían realizar las autoridades competentes habida cuenta de que el RSU, tanto en caracterización como en cantidad, que se tendrá con el paso del tiempo es muy diferente al de partida.

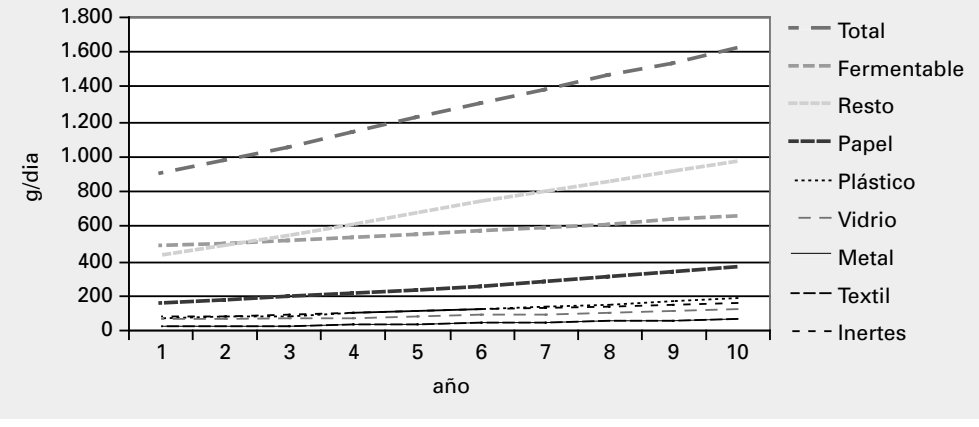


Figura 11.16. Estimación de la evolución en la composición de los residuos en México.

2.5. LA GESTIÓN DE LOS RSU EN ESPAÑA

En España se realiza una recogida selectiva de los residuos en origen y en la Tabla 11.22 se puede observar la cantidad de residuos generados anualmente y su composición según su recogida. Esto da una medida de la cantidad de residuos recogidos mezclados respecto de los recogidos de la manera apropiada.

Tabla 11.22. Residuos urbanos recogidos selectivamente en España

RSU recogido selectivamente en España	Total
Total	**2.596.519**
Aceites usados	109.874
Caucho (neumáticos.)	9.710
Pilas y acumuladores	21.756
Papel y cartón	648.187
Vidrio	636.007
Plásticos (excepto los procedentes de embalajes)	235.454
Metales	147.910
Madera	102.002
Embalajes compuestos	114.425
Envases mixtos	252.103
Residuos animales y vegetales	39.856
Residuos sanitarios	6
Ropa y residuos textiles	3.442
Medicinas y productos químicos	67.589
Equipos desechados (electrodomésticos)	5.602
Vehículos fuera de uso	7.885
Otros	194.711

El volumen de residuos mezclados en 2002 fue de 24 millones de toneladas, lo que supone una media de 570 kilogramos por habitante y año. En cuanto al tratamiento de estos residuos, 17 millones de toneladas se depositaron en los vertederos, 2,96 millones se destinaron al reciclado, 2,74 millones se destinaron al compost (abono orgánico) y 1,3 fueron incinerados para generar energía eléctrica o fermentados para producir biogás.

En el decurso de los últimos años, y como muestra la Figura 11.17, la evolución del tratamiento de los RSU en España ha mejorado algo, llegándose a un reparto, en las diferentes vías de gestión, que hace la gestión ambiental más sostenible.

No obstante, como ya se ha comentado, es preciso aumentar el reciclado y la incineración en detrimento del vertido.

2.5.1. Previsiones del Plan Nacional de Residuos Urbanos

Según las previsiones del Plan Nacional de Residuos Urbanos (PNRU) aprobado en enero de 2002, la gestión de los RSU debería ser la indicada en la Tabla 11.23.

Tabla 11.23. Destino de los RSU de acuerdo con el PNRU

Destino (Gestión)	Situación 1996 (%)	Previsto 2006 (%)
Reciclaje	11,6	25,0
Compostaje	13,9	24,2
Valorización energética	4,1	17,7
Vertido controlado	58,2	33,1
Vertido incontrolado	12,2	0
Total	**100,0**	**100,0**

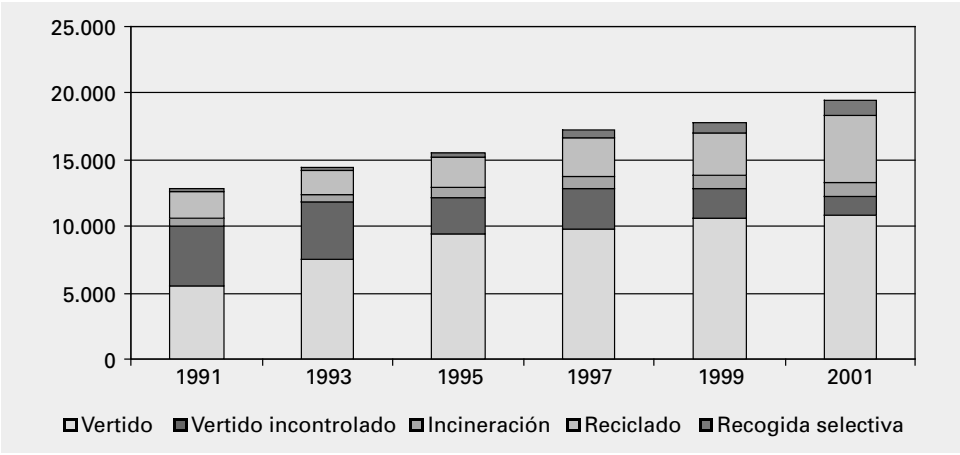


Figura 11.17. Evolución del tratamiento de los RSU en España.

2.6. LA GESTIÓN DE LOS RSU EN EUROPA

Las cantidades de RSU y la gestión de los mismos en los diversos países de la UE son diferentes, puesto que la UE esta formada por un conjunto de países con sistemas de vida, clima y economías dispares.

2.6.1. Producción de RSU en Europa

Según datos de «Eurostat» las producciones de RSU, en kg/habitante y año, para diferentes países son las que reproduce la Tabla 11.24.

Tabla 11.24. Producción de RSU para diversos países de la UE

País	1995	1997	1999	2001	2003
UE (25)	457	485	513	520	534
UE (15)	482	511	545	558	577
Alemania	533	556	605	600	638
Austria	438	532	566	578	610
Bélgica	455	464	460	462	446
Chequia	302	318	327	273	280
Dinamarca	567	588	627	677	675
España	467	517	576	595	609
Francia	489	511	523	545	561
Italia	450	463	492	508	523
Grecia	306	372	405	417	428
Hungría	460	487	482	451	463
Polonia	285	315	319	287	260
Portugal	385	402	442	472	452
Reino Unido	496	527	562	582	610
Rumania	342	325	314	336	364
Suecia	380	416	428	442	471
Turquía	472	530	536	474	474

El análisis de la tabla anterior pone de manifiesto dos particularidades bien definidas:

- El aumento de los RSU parece imparable en todos los países de la UE, con un incremento superior al 20% en los años que indica la tabla.
- A pesar de la puesta en marcha de leyes tendentes a la contención de los RSU, como la Ley de envases y a las grandes campañas de educación ambiental, el aumento en la generación de residuos persiste.

2.6.2. Tratamiento de los RSU en diversos países de la UE

Por lo que hace referencia al tratamiento, la Figura 11.18 muestra las vías de gestión usadas para los RSU de algunos países bien representativos de la UE.

La Figura 11.18 hace referencia tan solo a los porcentajes de los sistemas de tratamiento de RSU en algunos países de la UE (15) durante 2003. Un análisis con carácter retrospectivo pondría de manifiesto que:

- En casi todos los países de la UE ha descendido el vertido como sistema de tratamiento.
- De manera paralela se ha incrementado el reciclaje y la valorización energética.

Es de esperar que el aumento de la densidad de población en el territorio, la Ley 1999/31/CE referente al vertido de materiales orgánicos, la escasez de materias primas y la creciente necesidad energética en todo el territorio de la UE, conduzcan a un incremento de las tasa de reciclaje y sobre todo, de valorización energética en detrimento del vertido.

2.6.3. Tratamiento de las fracciones recogidas selectivamente en la UE

Para tener una idea de la complejidad que supone la recogida selectiva de ciertas fracciones de los RSU,

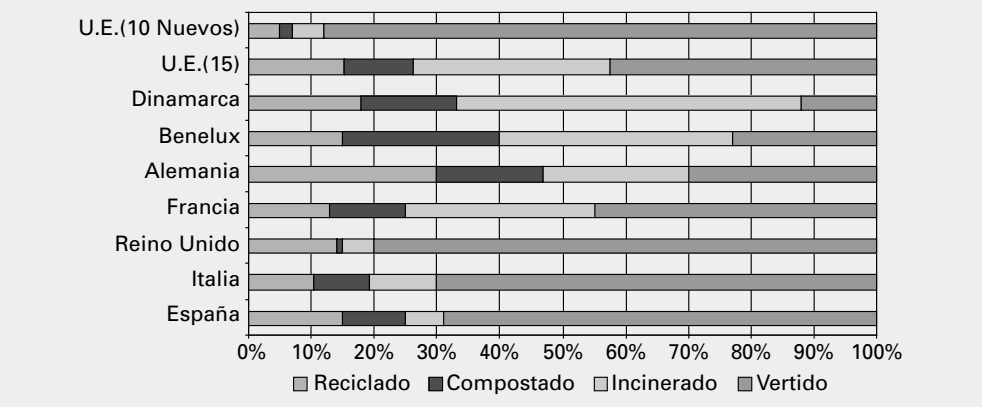


Figura 11.18. Tratamiento de los RSU en diversos países de la UE.

Tabla 11.25. Caracterización completa de los RSU

Categoría	Subcategoría	% peso	% peso
Papel y cartón	Periódicos	27,4	8,6
	Revistas		4,3
	Otros papeles		6,8
	Cartones		0,6
	Cartón de embalaje		3,3
	Otros cartones		3,8
Plástico film	Bolsas	3,8	0,3
	Otros films		3,5
Plástico denso	Botellas transparentes	6,0	0,6
	Botellas coloreadas		0,1
	Otras botellas		1,0
	Envases de alimentos		1,6
	Otros plásticos densos		2,7
Textiles	Textiles	1,9	1,9
Combustibles Diversos	Diversos	10,3	7,1
	Otras materias combustibles		3,2
Materias no combustibles	Materias no combustibles	4,6	4,6
Vidrio	Botellas color ámbar	9,7	0,4
	Botellas color verde		1,5
	Botellas transparentes		2,2
	Jarras de vidrio		1,8
	Vidrio roto		3,8
Fermentable	Residuos de jardín	21,7	3,6
	Otros fermentables		18,1
Metales férreos	Botes de bebida	6,1	0,8
	Latas de alimentos		4,2
	Baterías		—
	Otros envases		0,3
	Otros hierros		0,8
Metales no férreos	Botes de bebidas	1,7	0,4
	Films		0,5
	Otros metales no ferrosos		0,8
Finos	Tamaño hasta 10 mm	6,8	6,8
TOTAL		**100,0**	**100,0**

la Tabla 11.25 reproduce una composición media de los RSU, realizado en el Reino Unido en 1992.

Existe una disparidad de criterios en cuando a la recogida selectiva de las diversas fracciones que integran los RSU en los diferentes países de la UE. El motor que anima a todos ellos es el mismo: la importancia y la necesidad del reciclaje, sin embargo, los criterios tienen que ver con la geografía, el urbanismo, el clima, los hábitos, el presupuesto disponible, etc. Y todo ello conduce a que se aprecien grandes diferencias o tendencias.

La mayor parte de las estadísticas que aparecen seguidamente proceden de «Eurostat» y de otras fuentes que se citan en cada caso.

2.6.3.1. Situación del papel

El residuo de papel y cartón procedentes del embalaje supone un tercio del total de la generación de residuos de papel y cartón. Alguno de los datos usados han sido extraídos de la CEPI (*Confederation of European Paper Industries*).

En los últimos 20 años la generación de residuo de papel se ha doblado, pasando de 41 millones de toneladas en 1983 a 79 millones de toneladas en 2002. El ratio de papel recogido se ha incrementado fuertemente desde el 41% en 1990 al 56% en 2002, como muestra la Figura 11.19.

El resultado en el 2002, con una tendencia estable, es que el 44% del papel y cartón usado sigue yendo al vertedero y el 56% se recoge para su reciclado.

2.6.3.2. Situación del plástico

Las estadística, además del Eurostat, proceden en este caso de la APME (*Associaton of Plastics Ma-*

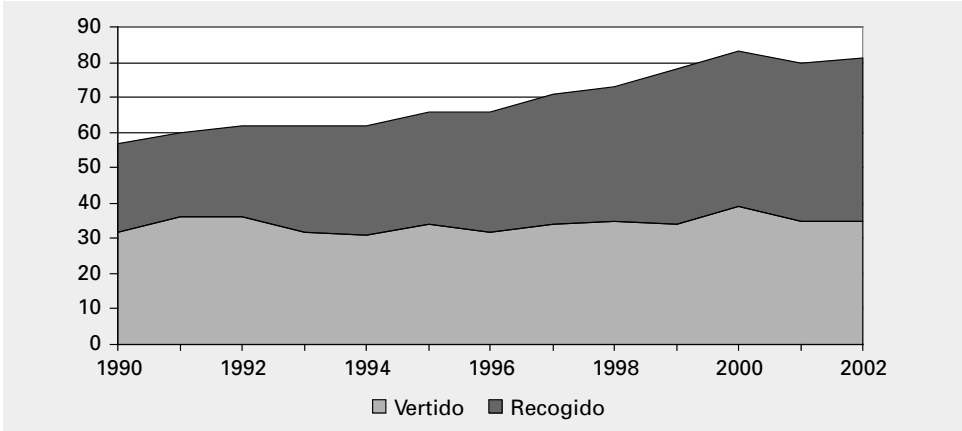


Figura 11.19. Gestión de residuos del papel en Europa. (Millones de t/año).

nufacturers in Europe). La generación de residuos de plásticos en Europa occidental se ha incrementado un 50% entre 1990 y 2002, desde 25 a 37 millones de toneladas (3,75% de media por año). En el mismo periodo, el consumo per capita pasó de 64 kg/año a 95 kg/año.

La Tabla 11.26 (APME 2004) muestra diversos parámetros relativos a los plásticos de diferentes países de Europa.

Tabla 11.26. Índices de consumo de plásticos y reciclaje en la UE

País	% plástico en RSU	Recuperado x 10^3 t	Reciclado x 10^3 t	% reciclado	Vertedero x 10^3 t
Alemania	5,5	3.161	983	31	1.372
Austria	12,5	350	67	19	210
Dinamarca	8,0	351	36	10	73
España	10,5	2.095	314	15	1.515
Finlandia	5,0	162	22	14	111
Francia	10,5	3.120	287	9	1.835
Grecia	7,5	317	6	2	311
Irlanda	10,5	204	16	8	188
Italia	11,5	3.396	438	13	2.530
Noruega	8,0	181	19	11	85
P. Bajos	11	1.027	166	16	318
Portugal	10	453	13	3	330
R. Unido	10	3.682	295	8	3.093
Suecia	7,5	384	32	8	179
Suiza	15	545	40	7	128

Como muestra la Figura 11.20, en este periodo, el ratio de reciclaje se dobló pasando del 7% al 15%, mientras que la producción de energía procedente de este residuo se incrementó del 16% al 23%, mientras que el vertido descendió del 77% al 62%. Con todo, como indica la Figura 11.20, el vertido sigue siendo la opción de gestión mayoritaria puesto que fue del 62% (equivalentes a 12,7 millones de toneladas).

De acuerdo con la APME, el sector del embalaje acapara cerca del 38% del consumo de plásticos mientras que los agrícolas superan escasamente el 3%. Las cifras totales, del año 2002 indican que la recuperación energética tiene tendencia al aumento. En el Capítulo 13 de esta obra se amplía mucho toda la información referida a la gestión de residuos de plástico.

2.6.3.3. Situación del vidrio

El total de residuo de vidrio procedente de envases en Europa occidental fue, en 2002 de alrededor de 15 millones de toneladas, lo que corresponde a una tasa de 38 kg per capita.

La producción de residuos de vidrio se ha incrementado un 26% entre el 1990 y 2002 (un 2% anual), mientras que el ratio de reciclado, en el mismo período ha pasado de un 43% al 59%. En este año la cantidad que se disponía en vertedero era del 41%. En cifras absolutas esto significa que en el mismo periodo de tiempo la disposición ha disminuido en 600.000 toneladas (un 9%).

Con excepción de Italia, todos los países de la unión han incrementado su tasa de reciclaje y recuperación. La Tabla 11.27 muestra la situación pormenorizada en diversos países de Europa.

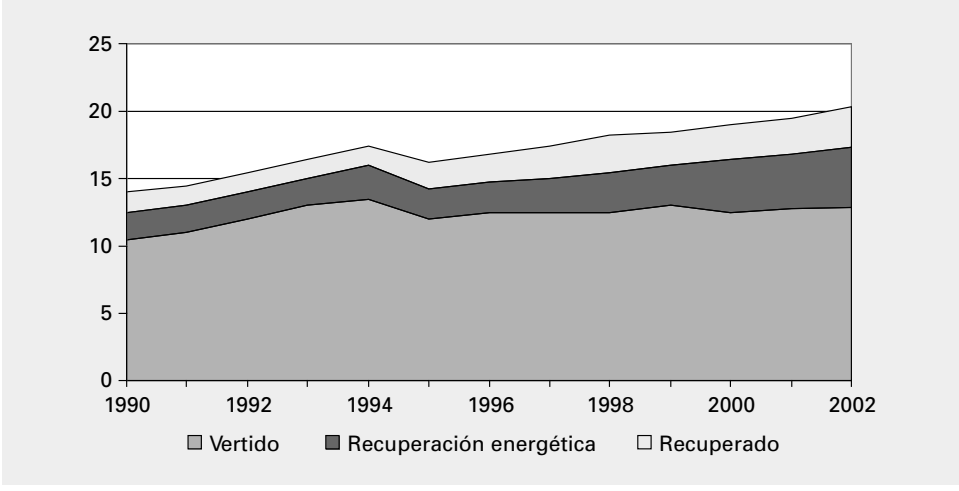


Figura 11.20. Gestión de residuos de plástico en Europa. (Millones de t/año).

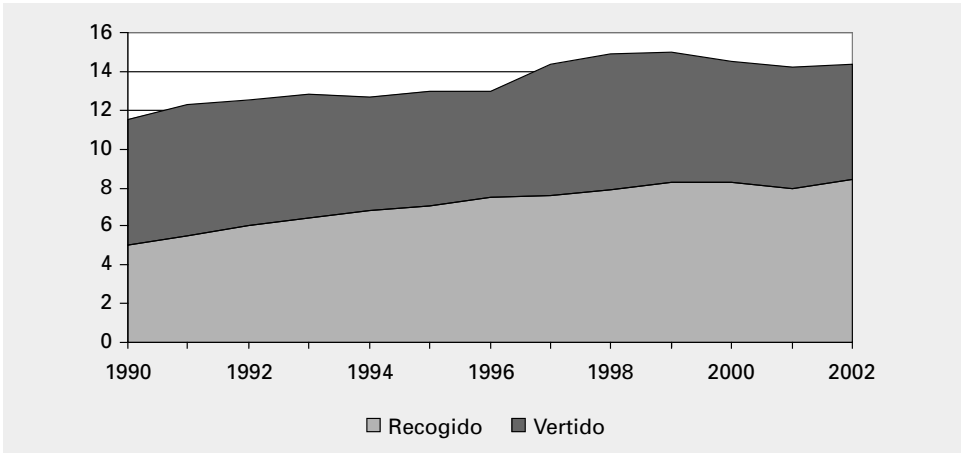


Figura 11.21. Gestión de residuos de vidrio en Europa. (Millones de t/año).

Tabla 11.27. Ratios y reciclaje de vidrio en países de la UE

País	Residuo de vidrio x 10^3 t	Reciclado x 10^3 t	% Reciclado
Alemania	3.763	3.146	84
Bélgica	556	420	76
España	1.532	575	38
Finlandia	58	37	64
Francia	3.364	1.691	50
Irlanda	111	36	32
Países Bajos	507	396	78
Portugal	315	138	44
Reino Unido	2.155	583	27

2.6.3.4. Situación de los metales

La gran demanda mundial de metales para la fabricación de bienes y servicios conduce a una creciente escasez de los llamados «metales primarios» y debe recurrirse a los denominados «metales secundarios» o de reciclaje. En este sentido los RSU no son precisamente una gran fuente de materias primas secundarias, si se exceptúan el hierro y el aluminio. Sin embargo, la Tabla 11.28 da una idea de la variedad de metales, si citan los más frecuentes pero también hay que pensar en otros como Cd o Cr, que suelen estar presentes en los RSU y que su uso indebido se transforma en contaminación.

En el caso del aluminio, las estadísticas proceden de la EAA (*European Aluminium Associaton*). El aluminio consumido en la UE (más Noruega y Suiza) fue, en 2002, de 8,86 millones de toneladas y la cantidad de aluminio reciclado de 3,6 millones de toneladas.

El consumo de aluminio en Europa, ha pasado de 14 a 22 kg/habitante en 2002 (un incremento promedio de un 2% anual). Austria es el país que más consume 34 kg/habitante y Portugal el que menos, solo 10.

Los sectores del automóvil y de la construcción absorben cerca del 60% del consumo, mientras que el envase y embalaje supone el 18%. Todos los países de Europa, a excepción de Italia y Suecia, han aumentado el porcentaje de reciclaje de aluminio entre 1990 y 2002.

Tabla 11.28. Metales no ferrosos en los RSU

Metal	Forma/estado	Aplicaciones
Cu	Metal	Cables, tuberías y artículos de cocina.
	Aleación	Latones, tortillería y otros.
	Recubrimiento	Artículos decorativos y otros.
Zn	Metal	Baterías de C-Zn.
	Aleación	Carpintería metálica, juguetes, aplicaciones domésticas.
	Recubrimiento	Galvanizados. Artículos de cocina y jardinería.
Sn	Aleación	Bronces, componentes de soldaduras
	Recubrimiento	Latas, botes, juguetes, artículos cocina, componentes eléctricos.
Pb	Metal	Tuberías, componentes eléctricos (bulbos), termómetros, vitolas de botellas.
	Aleación	Baterías de Pb-ácidas. Productos para fontanería.
	Química	Pinturas de Pb. Como óxido y sulfato en las baterías.
Ni	Metal	Acabados de superficie.
	Aleación	Artículos de cocina y jardinería.

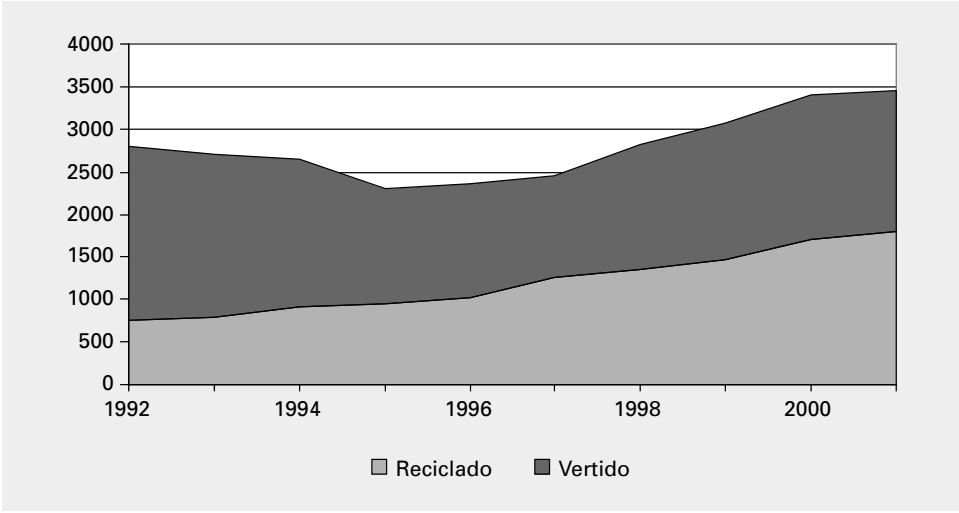


Figura 11.22. Gestión de residuos de metal en Europa. (Millones de t/año).

El ratio de reciclaje de aluminio procedente de los botes se acerca, en Europa, al 41%, mientras que el procedente de la construcción es del 85% y del 95% si procede de la industria del automóvil.

Las estadísticas del acero provienen del EUROFER (*European Confederation of Iron and Steel Industries*) y la APEAL (*Associaton of European Producers of Steel Parking*). En la Europa accidental el consumo de acero fue de 412 kg/habitante (2003). El acero destinado a envases y embalajes solo es un 3% del total.

3. Residuos tóxicos en los RSU

Uno de los residuos conflictivos presentes en los RSU son los formados por los componentes eléctricos y electrónicos fuera de uso. Conscientes de la problemática ambiental que ello supone, las autoridades comunitarias han elaborado una ley: Ley sobre Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) para poner orden en este sector. Así, por ejemplo la Ley establece que a partir de 2006 se deberá recoger un promedio de 4 kg de residuos de RAEE procedentes de los hogares por habitante y año. Los fabricantes deben ser capaces de recuperar entre el 50% y el 60% de los productos que fabriquen. También, a partir de 2006 se prohíbe la utilización de plomo, mercurio, cadmio, cromo hexavalente y otros compuestos tóxicos en la fabricación de ordenadores, electrodomésticos y otros elementos similares.

Es preciso afrontar la realidad y ser conscientes de que entre el 0,5 y el 1% de los componentes de los RSU son residuos tóxicos y peligrosos. Se calcula que el consumo de pilas es superior a las 10 unidades por habitante y año. En España, las comunidades pioneras en establecer estudios que cuantifiquen este tipo de residuos han sido Euskadi y Navarra.

Basta con leer los numerosos estudios que se realizan sobre los contaminantes orgánicos en alimentos de amplio consumo, para hacerse una idea de la cantidad de compuestos tóxicos que, una parte será ingerida y otra arrojada a la basura, para comprender la magnitud del problema que supone la extensión y globalización del problema (pollos belgas contaminados con dioxinas y PCB's en 1999, los niveles de benzo(a)pireno en los aceites de orujo, etc.).

Un motivo de reflexión sería el estudiar si la presencia de un 1% de productos tóxicos y peligrosos en los RSU no debería modificar la calificación de los RSU como residuos o, al menos, exigir importantes modificaciones en los sistemas de tratamiento convencionales que en la actualidad se dispensan a este tipo de residuos.

3.1. DEFINICIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS (RPU) EN LOS RSU

Los RPU son los materiales desechados de las viviendas que cumplen con los criterios de residuos peligrosos. Estos se hallan bien especificados en el

RD 1999/31/CE y, por tanto, no hace falta insistir en que consisten los residuos tóxicos y peligrosos, en síntesis son:

- Materiales que exhiben características de corrosividad (pH <2 y pH >12), reactividad (material inestable o que reacciona con el agua), toxicidad (por el propio material o su lixiviado), inflamabilidad («*flash point*» inferior a 60 °C), etc.
- Aquellos que, simplemente, están tipificados como residuos peligrosos.

La ambigüedad reglamentaria ha llevado a mucha confusión e inactividad por parte de las autoridades para atajar o controlar el problema. El problema real y ambiental de esta tipología de residuos es que están exentos por ley de las regulaciones a que se hallarían sujetos un residuo homólogo que se produjera en una industria ya que los RPU se generan en los domicilios.

3.1.1. Naturaleza de los contaminantes

La Tabla 11.29 refleja, a título de ejemplo, algunos de los compuestos químicos más frecuentes que forman parte de los RPU.

A esta relación se debería añadir aquellos compuestos tan frecuentes hoy en día, como pueden ser los compuestos bromados, que se usan ampliamente en los plásticos comerciales debido a las propiedades ignífugas que proporcionan.

3.1.2. Descripción de los principales contaminantes

Sin ánimo de ser exhaustivo, seguidamente se exponen las principales propiedades de los compuestos químicos citados en la Tabla 11.29 y que son de manera directa o indirecta frecuentes en muchos productos domésticos.

- *Benceno:* C_6H_6. Líquido de color amarillo, olor típico aromático y soluble en alcoholes, éter, acetona, etc. Es cancerígeno. Muy inflamable. Los límites inferior y superior de explosividad en aire son 1,5 y 8% respectivamente. Se emplea en la fabricación de innumerables artículos algunos tan usuales como dodecilbenceno (para detergentes), ciclohexano (para nylon), muchos disolventes, etc.

Tabla 11.29. Compuestos tóxicos en productos comerciales

Compuesto químico	Productos comerciales que usualmente lo contienen
Benceno	Líquidos de limpieza en seco, fumigantes, gasolinas sin plomo, insecticidas, aceites minerales, disolventes, pegamentos, quitamanchas, etc.
Cadmio (y otros metales)	Colorantes, pinturas, plásticos, materiales estabilizantes, barnices, etc.
Cloroformo	Anestésicos, refrigerantes (CFC's), fumigantes, insecticidas, lacas, productos farmacéuticos, disolventes.
Cloruro de metileno	Propelentes de aerosoles, desengrasantes, desecantes, fumigantes, ceras para muebles, aerosoles para el cabello, limpia hornos, pinturas, quita pinturas, limpiadores de fosas sépticas, limpia zapatos, cera de zapatos, disolventes, masillas, etc.
Cloruro de vinilo	Adhesivos para plásticos, productos para polímeros.
Dibromuro de etileno	Extintores, fumigantes, gasolinas, disolventes, preparados antihumedad.
Dicloroetano 1,2	Desengrasantes, fumigantes, gasolinas, quita pinturas, agentes penetrantes, compuestos de desgaste, jabones, disolventes, agentes humectantes.
Tetracloroetileno	Desengrasantes, líquidos de limpieza en seco, agentes de secado, medios de transferencia de calor, quitapinturas, quita manchas.
Tetracloruro de carbono	Desengrasantes, líquidos para limpieza en seco, agentes de secado, extintores, fumigantes, lacas, propulsores refrigerantes, disolventes.
Tolueno	Adhesivos, líquidos de limpieza en seco, tintes, gasolinas, aceite de motor, pinturas, quita pinturas, perfumes, productos farmacéuticos, disolventes, quitamanchas y masillas.
Tricloroetano 1,1,1	Propelentes de aerosoles, desengrasantes, desatascadores, cera para muebles, limpiahornos, quitapinturas, pesticidas, limpiaalfombras, agentes para fosas sépticas, tinte para zapatos, cera de zapatos, disolventes, quita manchas, etc.
Tricloroetileno	Adhesivos, desengrasantes, líquidos de limpieza en seco, tintes, fumigantes, limpia pieles, pinturas, productos farmacéuticos, limpiazapatos, cera para zapatos, disolventes, etc.
Xileno	Compuestos de calafateo, tintes, gasolinas, insecticidas, aceites de motor, pinturas, quitapinturas, pegamentos de goma, tinte para zapatos y disolventes.

- *Cadmio:* Elemento metálico de numero atómico 48. Tóxico por inhalación. Carcinógeno. Su uso como fungicida está restringido en muchos países. Se usa para recubrimientos electroquímicos (cadmiado), aleaciones de broncesoldadura, sistemas contra incendios, baterías de níquel/cadmio, bases de pigmentos para esmaltes y colorantes, fungicidas, fotografía y litografía, rectificadores de selenio, células fotoeléctricas, etc. Aunque no citados expresamente en la Tabla 11.29, se pueden nombrar otros metales muy frecuentes como el níquel o el cromo (ambos carcinógenos), el arsénico (teratogénico), el plomo (que provoca el saturnismo) o el mercurio (el hidrargirismo) y tantos otros, muchos de ellos muy frecuentes en numerosísimos productos domésticos.
- *Cloroformo* (triclorometano): $CHCl_3$. Líquido volátil incoloro, olor característico y sabor dulce. Tóxico por inhalación, anestésico; la inhalación prolongada puede ser fatal. Carcinógeno, ha sido prohibido por la FDA («*Food and Drug Administration*», agencia del gobierno norteamericano) para su uso en fármacos, cosméticos y envases de alimentos. Se emplea en la fabricación de algunos plásticos fluocarbonados, disolventes, fumigantes, insecticidas, etc.
- *Cloruro de metileno:* CH_2Cl_2. Es un gas no inflamable y no explosivo en el aire. Es tóxico y agente carcinógeno y narcótico. Se emplea como decapantes para pinturas, desengrasante, agente expansor de plásticos, para la extracción de disolventes y propulsor de aerosoles.
- *Cloruro de vinilo,* cloroetano o cloroetileno: CH_2:CHCl. Se trata del más importante de los monómeros vinílicos. Es un gas fácilmente licuable, con una temperatura de autoignición de 472 °C y ligeramente soluble en agua. Los límites de explosividad son de 4 y 22% en el aire. Es un producto extremadamente tóxico y peligroso por todos los medios de exposición. Es agente cancerígeno (La OMS recomienda un límite de exposición en continuo de 1 ppm). Su uso en vaporizadores está prohibido. Se emplea para la fabricación del policloruro de vinilo (PVC) y copolímeros, síntesis orgánicas y adhesivos para plásticos.
- *Dibromuro de etileno:* 1,2-dibromoetano: $BrCH_2CH_2Br$. Se trata de un líquido no inflamable de olor dulzón y ligeramente soluble en agua. Es cancerígeno, tóxico por inhalación, ingestión y absorción cutánea, fuerte irritante para la piel y los ojos. Se emplea en gasolinas lubricantes, fumigantes para cereales, disolventes en general, síntesis orgánicas. Puede envenenar los catalizadores de platino.
- *Tetracloroetileno o percloroetileno:* Cl_2C:CCl_2. Líquido incoloro de olor semejante al éter. Insoluble en agua y no inflamable. Irrita a los ojos y la piel. Se usa como disolvente para la limpieza en seco y desengrasado de vapor, secante para metales y otros sólidos, vermífugo, usado en la fabricación de flourocarbonos.
- *Tetracloruro de carbono,* tetraclorometano o percloruro de metano: CCl_4. Se trata de un hidrocarburo clorado, líquido incoloro que desprende vapores cinco veces más pesados que el aire. Insoluble en agua pero soluble en alcoholes y disolventes. No combustible. Tóxico por ingestión, inhalación y absorción cutánea, narcótico y cancerígeno. No debe usarse para apagar fuego; a altas temperaturas se descompone a fosgeno. Se emplea como refrigerante, desengrasante de metales, fumigante para agricultura, para la producción de semiconductores y disolventes (Grasas, caucho de aceite, etc.). La FDA lo ha prohibido para productos destinados a usos domésticos.
- *Tolueno,* metilbenceno o fenilmetano: $C_6H_5CH_3$. Líquido incoloro de olor parecido al benceno. Temperatura de inflamación a 536 °C, soluble en alcohol, benceno y éter pero insoluble en agua. Es inflamable y tiene riesgo de incendio. Límites explosivos: 1,27 y 7% en el aire. Es tóxico por ingestión, inhalación y absorción cutánea. Se emplea en la gasolina de aviación y mezclas de alto octanaje, materia prima para la fabricación de benceno, fenol y caprolactama, disolvente para pinturas y revestimientos, gomas, resinas, la mayoría de aceites, caucho, diluyentes de laca de nitrocelulosa, productos químicos (ácido benzoico, sacarinas, medicinas, colorantes, perfumes, etc.), resinas de poliuretano, explosivos (TNT), detergentes, etc.
- *Tricloroetano 1,1,1* o metilcloroformo: CH_3CCl_3. Líquido incoloro, insoluble en agua y no inflamable. Irrita los ojos y la piel. Se utiliza como disolvente para la limpieza de instrumentos de precisión, desengrasado de metales, limpiador de aparatos domésticos, pesticidas, procesos textiles y propelentes de aerosoles.

- *Tricloroetileno:* CHCl:CCl_2. Líquido incoloro de bajo punto de ebullición y olor parecido al cloroformo. Miscible en disolventes orgánicos y poco miscible en agua. No inflamable. Es tóxico por inhalación y su empleo como disolvente está restringido en muchos países. La FDA lo ha prohibido para su uso en alimentos, fármacos y cosméticos. Se emplea como desengrasante de metales, disolvente para la extracción de aceites, grasas, ceras; disolvente para colorantes, limpieza en seco, síntesis orgánicas, fumigantes, acabado de componentes electrónicos, diluyentes de pinturas y adhesivos y en procesos textiles.
- *Xileno* o dimetilbenceno: $C_6H_4(CH_3)_2$. Líquido claro soluble en alcohol y éter pero insoluble en agua. Punto de inflamación a 46,1 °C. Inflamable con moderado riesgo de incendio. Tóxico por ingestión e inhalación. Se emplea en la gasolina de aviación, revestimientos protectores, disolvente para resinas alquídicas, lacas, esmaltes, cementos de caucho, síntesis de productos químicos, fabricación de productos de aseo, como geles de baño ya que aportan suavidad.

Como puede observarse, solo habiendo citado los más frecuentes, muchos de ellos son potentes agentes cancerígenos o altamente tóxicos. Sin embargo siguen usándose para la fabricación de un sinfín de materiales o como base para la fabricación de productos de uso doméstico. Es de pensar que su empleo en la formulación de infinidad de productos de uso doméstico se halla regulado, de una u otra manera, por las autoridades sanitarias. No obstante el problema ambiental arranca en el momento en que el producto, o parte de él, se lanza junto con los RSU.

En esta descripción también deberían añadirse otros compuestos muy comunes como:

- *Alquilofenoles.* Compuestos que se añaden a los detergentes industriales y también se emplean en los acabados textiles, cuero y para la formulación de algunos plaguicidas y lubricantes.
- *Piroretardantes halogenados.* Generalmente bromados que se incorporan a la formulación de los plásticos empleados en los aparatos electrónicos para prevenir los incendios. También aparecen en ciertos materiales de construcción como textiles y plásticos.
- *TPB-A.* Retardante de llama halogenado usado en secadores, microondas, televisores, prendas de ropa, etc. Se ha detectado su presencia en la sangre.
- *Triclosan.* Agente bactericida que se emplea en muchos desinfectantes domésticos y productos de aseo tan comunes como los dentífricos, desodorantes o jabones.

3.2. CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS EN LOS RSU

La Tabla 11.30 reproduce algunos de los RPU más comunes presentes en la composición de infinidad de productos muy habituales de nuestra sociedad, así como el principal parámetro que le confiere la caracterización de tóxico y peligroso, sin citar los compuestos químicos peligrosos ya que, con frecuencia, contienen más de uno.

En la actualidad, y en diversos países, alguno de estos productos está sometido a ciertas restricciones para su inclusión en productos comerciales. Alguno de estos compuestos químicos forma parte integrante de los productos comerciales, no obstante en otras ocasiones están presentes en ellos como «residuo» procedente de la síntesis de los materiales que se destinan a la fabricación. Así por ejemplo, el bence-

Tabla 11.30. Principal peligro de los componentes de los RPU

Componente del RPU	Peligro	Componente del RPU	Peligro
Aceite lubricante	Combustible	Limpia horno	Corrosivo
Acetona	Inflamable	Gasóleo	Combustible
Aerosoles	Inflamable	Cera de muebles	Inflamable
Alcoholes	Inflamables	Pegamento epóxi	Inflamable
Amoniaco	Corrosivo	Agua oxigenada	Oxidante
Anticongelante	Veneno	Tinta	Inflamable
Barnices	Inflamable	Fumigador	Veneno
Butano	Inflamable	Aceite linaza	Inflamable
Cloro (piscinas)	Irritante	Desatascador	Corrosivo
Desengrasante	Corrosivo	Ácido muríaco	Corrosivo
Disolventes	Inflamables	Pegamento de goma	Inflamable
Esmalte uñas	Inflamable	Quita esmalte	Inflamable
Lejías	Corrosivas	Laca	Inflamable
Líquido de baterías	Corrosivo	Insecticidas	Venenos
Líquido frenos	Inflamable	Cal	Corrosiva
Mercurio	Muy tóxico	Cohetes	Explosivos
Pegamento contacto	Inflamable	Naftalina	Venenosa
Pintura base aceite	Inflamable	Limpia inodoros	Corrosivo
Propano	Inflamable	Cera de suelos	Inflamable
Protege maderas	Veneno	Tintes maderas	Inflamable
Salfumán	Ácido	Fungicidas	Veneno

no se halla presente, en cantidades traza, en algunas pinturas que han empleado tolueno para su fabricación. El contaminante (benceno) aparece como resultado de reacciones secundarias.

La presencia de los RPU parece que se está incrementando de forma importante tanto en la UE y en los EE UU, como en el resto de las naciones en vías de desarrollo. Es curioso observar que con independencia del nivel de desarrollo y educación ambiental la cantidad de residuos peligrosos aumenta en todos los países, con el agravante por parte de las naciones menos desarrolladas que cuentan con menos medios para atajar el problema que se deriva de una mala gestión.

3.3. PROBLEMAS OCASIONADOS POR LOS RESIDUOS PELIGROSOS EN LOS RSU

Es difícil establecer los flujos de cada uno de los componentes tóxicos hallados en los RSU ya que las estadísticas y datos son escasos. La Tabla 11.31 muestra una relación extraída de diversa bibliografía.

Tabla 11.31. Distribución de los RPU

Producto peligroso	% sobre el total
Aceites minerales	20
Aerosoles	2,5
Baterías y pilas	10
Corrosivos	5
Material electrónico	15
Otros	9
Oxidantes	0,5
Pintura base aceite	15
Pintura de látex	11
Varios inflamables	8
Venenos	4
Total	**100**

El porcentaje del 100% se refiere a la cantidad generada de RPU que oscila, por término medio entre el 0,5% y el 1% del total de los RSU.

El reciclaje de pinturas de látex es una práctica bastante común en determinadas comunidades. El sistema consiste en llevar los botes semivacíos al «punto limpio» allí se puede mezclar en bidones de 200 litros y expenderse de nuevo como pintura de base o de primera mano. Sin embargo esta técnica no es siempre posible. Algunas pinturas de látex no son reciclables porque están en mal estado o contienen contaminantes importantes como el mercurio, plomo u otros metales pesados. En EE UU se prohibió, en 1990, el empleo de pinturas de látex en interiores. Con respecto las pinturas en base aceite se sigue una política similar. En la UE la tendencia es al cambio paulatino de las pinturas base aceite por las de base agua.

Es curioso observar la gran presencia de aceites minerales. La mayoría proceden de envases parcialmente vacíos que se tiran a los RSU una vez cambiado el aceite del vehículo en el domicilio. En España, todas las comunidades con competencias en el campo del medio ambiente han puesto en marcha grandes campañas para erradicar esta práctica y que el aceite, y sus envases, se depositen en los talleres autorizados. Algo semejante acontece con los líquidos anticongelantes, cuyo ingrediente principal es el etilenglicol (que suele contener diversos metales como Cu, Pb, Zn, etc. y compuestos orgánicos, como el propio aceite) que puede ser recuperado y reciclado fácilmente para diversos usos.

El impacto que ello produce se puede establecer a tres niveles:

- Contaminación ambiental.
- Daños personales y domésticos.
- Lesiones profesionales.

3.3.1. Contaminación ambiental

Se han llevado a cabo gran cantidad de estudios basados en análisis de los lixiviados de vertederos y en biogás.

Para seguir la metodología establecida en la Tabla 11.29, la Tabla 11.32 muestra, de acuerdo con uno de los numerosos estudios realizados por la

Tabla 11.32. Concentración de compuestos orgánicos tóxicos en los lixiviados de vertederos de RSU

Compuesto químico	Rango concentración (ppm)	% De lugares donde se encontró
Benceno	4-1.080	34
Cloroformo	27-31	15
Cloruro de metileno	2-220.000	60
Cloruro de vinilo	8-61	11
Dibromuro de etileno	5-5	2
Dicloroetano 1,2	1-11.000	11
Tetracloroetileno	2-620	21
Tetracloruro de carbono	6-398	4
Tricloroetano 1,1,1	1-13.00	25
Tricloroetileno	1-1.300	32

USEPA (Agencia del Medio Ambiente del gobierno norteamericano), la frecuencia en la que aparecen los compuestos orgánicos peligrosos más habituales. Sin tener en cuenta los metales pesados ni sus compuestos, la Tabla 11.32 resume el estudio realizado en 53 vertederos, indicando el rango medio de concentración y el porcentaje de lugares donde se detectaron diversos compuestos peligrosos.

La concentración más alta fue la de cloruro de metileno, que alcanzó los 220.000 ppm y además también fue el compuesto orgánico que se encontró en mayor número de lugares. Teniendo en cuenta que estos resultados se publicaron a primeros de los 90's es fácil extrapolar que en la actualidad los valores resultarían mucho mayores.

La Tabla 11.33 sintetiza los amplios estudios llevados a cabo por la Dirección General de Recursos Atmosféricos de California. La tabla resume los resultados de 271 instalaciones de residuos no peligrosos (RSU).

Tabla 11.33. Concentración de compuestos orgánicos tóxicos en el biogás de vertederos de RSU

Compuesto químico	Rango concentración (ppm)	% De lugares donde se encontró
Benceno	500-29.000	51
Cloroformo	2-171.000	27
Cloruro de metileno	60-260.000	56
Cloruro de vinilo	500-120.000	47
Dibromuro de etileno	1-2.000	7
Dicloroetano 1,2	20-34.100	18
Tetracloroetileno	10-62.000	72
Tetracloruro de carbono	5-2.100	8
Tricloroetano 1,1,1	10-21.000	49
Tricloroetileno	10-20.000	68

Los análisis se realizaron sobre el gas emitido por los pozos de desgasificación de los vertederos, donde los 10 productos químicos antes citados también aparecieron. En la mitad de ellos se detectó benceno, cloruro de metileno, tetacloroetano y tricloroetileno. Lo alarmante es que los ensayos efectuados en vertederos de residuos peligrosos arrojaron valores semejantes, sin embargo estas conclusiones avalan las tesis de este autor en el sentido de que los RSU estándar no deberían catalogarse de residuos «no peligrosos».

Es evidente que puede establecerse una correlación entre los compuestos químicos hallados en los lixiviados y los presentes en el biogás, en ambos flujos se hallan presentes compuestos peligrosos. En el caso de los vertederos de RSU el compuesto detectado en mayor cantidad fue el cloruro de metilo. La citada Dirección General llegó a la conclusión de que la caracterización del biogás, en lo referente a compuestos químicos, era muy similar y no era posible distinguir el tipo de vertedero, de RSU o industrial, mediante el análisis del biogás emitido.

Como resultado de los estudios se puede llegar a ciertas conclusiones que, por otra parte, ya han sido reflejadas por la Directiva 1999/31/CE relativa al vertido de residuos, en particular por lo que respecta a:

- Obligatoriedad de tratar los lixiviados.
- Obligatoriedad de tratar el biogás. En este último aspecto hacer notar que, una vez recuperado el biogás, su destrucción en una antorcha no ofrece una garantía completa, sería mejor usar una cámara de combustión.

3.3.2. Daños personales, domésticos y a equipos

Dada la naturaleza de los principales ingredientes de los RPU los daños más frecuentes a las personas son los causados por los productos de limpieza, ya sean de carácter ácido (salfumán), alcalino (lejías) y en el caso de los menores la ingesta de medicamentos, no por su peligrosidad intrínseca sino por sus efectos toxicológicos.

Por lo que hace referencia a los equipos, los mayores percances se producen en los camiones de recogida debido, principalmente, a incendios y/o explosiones derivadas de la manipulación de aerosoles y bombonas de gas butano («camping gas»). Otras veces es debido a la presencia de líquidos inflamables o productos que entran en contacto con materiales incompatibles. Finalmente los vehículos de transporte tienen tendencia a perder los líquidos procedentes de los RSU que, obviamente, contendrán contaminantes.

En cuanto a las instalaciones de tratamiento, los accidentes más graves proceden de las explosiones en las trituradoras. La mayoría de los incidentes se producen en las plantas de fabricación de combustible derivado del residuo (RDF), pero también en plantas de compostaje. En los vertederos la maquinaria utilizada, en particular los tractores de aplanar y compactar, entran en contacto directo con este tipo de residuos y un accidente puede acarrear consecuencias imprevisibles.

3.3.3. Lesiones profesionales

En los incidentes descritos anteriormente, es fácil suponer que el operario puede verse involucrado en un accidente. De hecho se conocen accidentes con lesiones personales en todo el espectro de gestión: la recolección, el transporte y el tratamiento final. Las lesiones se han producido por escapes, rociado, contacto, emanaciones, incendios, quemaduras por productos químicos, etc.

En los últimos tiempos se han realizado bastantes estudios internacionales sobre la responsabilidad social de las empresas que fabrican productos cosméticos, de higiene, de limpieza, etc. Uno de ellos especialmente destacable es el realizado por Oekon Research en un universo de 200 empresas. El máximo galardón fue para la empresa alemana Henkel, ya que lleva a cabo anualmente estudios para la evaluación de la peligrosidad de ciertos ingredientes, en particular los cancerígenos, y evalúa la sostenibilidad global de los mismos sobre el medio.

3.3.4. Estimación de riesgos

La OMS (Organización Mundial de la Salud) proporciona información sobre la incidencia de una serie de sustancias en el medio, en particular en el aire. Así para compuestos frecuentes en vertederos, establece unos valores guía en mg/m^3. Entre paréntesis aparece la media de tiempo en que la exposición se estima como inocua:

- Diclorometano: 450 (1 semana).
- Mercurio: 1 (1 año).
- H_2S: 150 (24 horas).
- Tetracloroetileno: 250 (1 año).
- Tolueno: 260 (1 semana).

En sentido semejante la IARC (*International Agency for Resaerch on Cancer*) también establece una tablas de peligrosidad de ciertos compuestos para la contracción de cáncer. Las sustancias catalogadas de 1 son cancerígenas para los humanos, las 2, son «posiblemente o probablemente» cancerígenas para humanos. La clasificadas 3 en la tabla, son aquellas sustancias en que no hay una evidencia de que desencadenen cáncer en personas y, las 4 las que no provocan cáncer a las personas.

Entre la lista 1, cabe destacar la siguiente relación y, entre paréntesis, la localización más frecuente del cáncer:

- Benceno, (Sangre).
- Cromo VI (Pulmón).
- Hidrocarburos poliaromáticos (BaP): (Pulmón).
- Cloruro de vinilo: (Hígado y otros).

De entre la lista 2, cabe señalar:

- Tricloroetileno: (pulmón y otros).
- Acrilonitrilo: (pulmón).

3.4. CONSEJOS PRÁCTICOS PARA LA GESTIÓN DE LOS RSU TÓXICOS

Para erradicar o reducir la problemática ambiental y de seguridad que genera la presencia de los RPU, la mejor opción es acudir a la fuente del problema, la presencia de materiales tóxicos, y sustituirlos por otros inertes o menos conflictivos. El factor clave consiste en la concienciación del público. Para ello se deben dar a conocer listas como la Tabla 11.34 que ilustra de las alternativas presentes en el mercado sobre productos de limpieza doméstica.

Tabla 9.34. Alternativas a algunos productos de jardinería

Producto	Técnica o producto alternativo
Aerosoles	Usar pulverizadores de acción manual, o propelentes no-aerosol.
Ambientadores	Usar vahos de hierbas aromáticas. Ventilación natural.
Cera para muebles	Usar jabón de aceite.
Desatascadores	Emplear filtros en los desagües. Usar agua hirviendo.
Lejía de cloro	No mezclar lejía con limpiadores ácidos. Emplear limpiadores en base bicarbonato sódico y/o boro.
Limpia azulejos	Usar polvo abrasivo o bicarbonato de sosa.
Limpia cristales	Emplear una disolución de vinagre en agua tibia.
Limpia hornos	Echar agua tibia con sosa. Después lavar.
Limpia tapicerías	Emplear un limpiador de jabón no aerosol.
Limpiador de suelos	Emplear una disolución de vinagre (suelos de plástico) y jabón de aceite en agua tibia (suelos de madera).
Quitamohos	Usar bicarbonato de sosa o una esponja empapada en vinagre blanco.

Naturalmente no todos los productos de limpieza son tóxicos, pero muchos de ellos si. La Tabla 11.34 propone una serie de alternativas, mientras que la Tabla 11.35 propone lo mismo para productos usados en jardinería.

Tabla 11.35. Alternativas a algunos productos de jardinería

Producto	Técnica o producto alternativo
Fertilizantes químicos	Fabricar el propio compost
Fungicidas	Emplear azufre y/o aceite inactivo (sin Cu). Eliminar las hojas y tallos muertos.
Insecticidas (interiores)	Las zonas limpias evitan insectos. Usar ácido bórico.
Insecticidas (jardín)	Los pulverizadores menos tóxicos incluyen: jabón insecticida, piretrina, disolución casera de ajo y pimentón.
Matababosas	Colocar un cazo poco profundo con cerveza.

La eficacia de estas medidas es directamente proporcional a la capacidad de difusión de estas alternativas entre los usuarios, de ahí la importancia de la educación ambiental. No obstante, la autoridad debería empezar por restringir o prohibir el empleo de muchos componentes tóxicos para la fabricación de un sinfín de productos de uso doméstico.

En conclusión: la presencia de productos peligrosos y tóxicos en los RSU es importante y todo indica que su cantidad apunta al alza. En esta tesitura, el vertido incontrolado se antoja como un atentado a la salud y al medio ambiente, mientras que el vertido controlado se está viendo que también presenta ciertos inconvenientes o serios interrogantes a largo plazo. Es preciso hacer un gran esfuerzo de formación y concienciación ciudadana y establecer sistemas (recogida selectiva, puntos limpios) para acotar el problema. Con todo, hoy por hoy, el sistema mejor preparado para evitar la contaminación es la incineración.

4. El tratamiento de RSU en España

El modelo de tratamiento de gestión de RSU, en España, consiste en el depósito controlado como vía mayoritaria. Las Tablas 11.36 y 11.37 detallan el destino de los residuos en España. (Obsérvese, una vez más, que según el origen de la fuente de información, los residuos son clasificados o denominados de una manera diferente, lo que puede inducir a confusiones).

La Tabla 11.37 muestra el destino final de todos aquellos residuos que no han podido ser separados y recuperados, es decir, destinados a eliminación (vertido o incineración).

De la Tabla 11.37 se deduce que, de los RSU generados en España tan solo una mínima parte, alrededor del 6%, se incinera y de ellos se obtienen 386.000 MW. Sí de la parte que se destina a vertido se hiciera lo mismo se obtendrían 7.000.000 MW, es decir, una potencia eléctrica, teórica, equivalente a 6 centrales nucleares convencionales. Obviamente se trata de un ejercicio teórico, sin embargo debería mover a reflexión a las autoridades pertinentes en los tiempos en que nos ha tocado vivir, donde la energía de origen fósil es cada vez más necesaria y, a la vez más escasa. La otra cara del ejemplo propuesto son los problemas ambientales asociados al vertido ya sea a corto como a medio plazo, en particular los derivados de los vertidos incontrolados.

Tabla 11.36. Destino de los residuos en España

	Reciclado	Destinados al compost	Destinados eliminación
Residuos domésticos	2.956.236	2.745.653	9.308.066
Aceites usados	17.074	0	9.526
Residuos de caucho	509	0	2.894
Pilas y acumuladores	247	0	1
Papel y cartón	112.979	0	1.420
Vidrio	29.791	0	6.399
Plásticos (excepto de embalajes)	76.714	0	1.370
Metales	29.706	0	14
Maderas	15.950	0	2.788
Embalajes compuestos	18.650	0	6.183
Envases mixtos	37.695	0	20.252
Residuos animales y vegetales	0	13.992	1.740
Residuos sanitarios	0	0	1.454
Ropa y residuos textiles	1.016	0	25
Medicinas y productos químicos	5	0	0
Equipos desechados (electrodomésticos)	866	0	131
Vehículos fuera de uso	0	0	0
Otros	3.471	0	26.029

Fuente: Instituto Nacional de Estadística.

Tabla 11.37. Residuos vertidos o incinerados en España

	Cantidad de residuos t	Resultados de la operación. Producción de energía: Biogás (KW)	Resultados de la operación. Producción de energía: Energía eléctrica (KW)	Resultados de la operación. Producción de energía: Biocarburantes (m^3)
Incineración	1.487.660	0	371.863.580	0
Vertido: Total	17.058.985	—	0	—
Vertido: En el suelo	861.873	0	0	0
Vertido: En lugar especialmente diseñado	15.706.764	12.910.555	14.071.467	9.004.388
Vertido: Otros	490.348	0	0	0
Otros tratamientos (pirolisis, etc.)	12.050	0	0	0
Total	18.546.645	12.910.555	385.935.047	9.004.388

Fuente: Instituto Nacional de Estadística.

4.1. EL TRATAMIENTO DE LOS RSU EN ESPAÑA COMO MIEMBRO DE LA UE

Buena parte de los países de la UE tienen un relieve del terreno suave y un régimen de lluvias generoso, en particular los ubicados en el norte del continente, factores que complican extraordinariamente la construcción de vertederos. Por otra parte, también la mayor parte de ellos precisa energía y en los RSU han hallado una energía barata y, sobre todo, renovable.

En el caso de los RSU, la renovabilidad del recurso energético es un factor a tener cada día más en cuenta. Por una parte la generación de energía con materia renovable da lugar a un CO_2 de carácter neutro, no computa a efectos de Kyoto. Pero, a la vez el biogás procedente de las reacciones de los RSU en los vertederos produce una gran cantidad de metano (gas de potente efecto invernadero, 21 veces más potente que el CO_2) y otros mucos gases contaminantes y de fuerte efecto invernadero.

La Tabla 11.38 muestra la tendencia en el tratamiento de los RSU, en distintos países de la UE.

De la Tabla 11.38 se desprende la gran disparidad de vías de tratamiento en los diversos países. Si bien el vertido es la vía más usada, el incremento de la incineración es notable. Además, es de resaltar que, en el periodo de tiempo reseñado, todos los países han incrementado el porcentaje destinado a incineración.

De las naciones citadas vale la pena destacar el caso de los Países Bajos. Este país se propuso en la década de los 1980 llegar al vertido cero a finales del siglo y, a efectos prácticos, se puede afirmar que lo ha conseguido.

Tabla 11.38. Residuos vertidos o incinerados en diversos países de la UE

País	% de vertido		% Incinerado	
	1995	2003	1995	2003
Alemania	46,0	19,9	18,2	22,9
Austria	46,8	30,0	12,3	10,7
Bélgica	47,9	12,6	35,8	35,7
Chequia	100,0	71,8	0,0	13,9
Dinamarca	16,9	5,0	51,9	53,8
España	66,2	59,3	5,1	6,6
Finlandia	64,7	63,3	0,0	9,1
Francia	44,8	38,1	37,4	33,7
Italia	93,1	61,8	5,3	9,4
Grecia	100,0	91,8	0,0	0,0
Hungría	75,2	84,2	7,0	5,2
Países Bajos	28,8	2,7	25,3	32,9
Polonia	98,2	96,5	0,0	0,4
Portugal	51,9	74,8	0,0	21,7
Reino Unido	82,7	75,4	7,1	7,4
Suecia	35,8	13,6	39,2	45,0

Como ya se ha comentado, el aumento de renta disponible conlleva otra caracterización de los RSU que se traduce en un incremento del PCI (un parámetro técnico fundamental a tener en cuenta en la planificación de un Plan Director de Residuos. Si, por ejemplo, se diseña una incineradora para una capacidad de tratamiento determinada, habrá de contemplarse esta contingencia ya que al tratarse de una máquina térmica la incineradora trabaja en términos de energía. Sí con el tiempo el PCI aumenta, la ener-

Tabla 11.39. Diversas caracterizaciones de un RSU típico

Composición	**% peso**	**Análisis elemental**	**% peso**
Papel/cartón	33,0	C	21,5
Plásticos	7,0	H	3,0
Vidrio	10,0	O	16,9
Metales	8,0	N	0,5
Fermentables	20,0	S	0,2
Textiles	4,0	Cl	0,4
Otros	18,0	**Metales**	**Mg/kg**
Análisis racional	**% peso**	Cu	200-700
Fracción combustible	42,1	Cr	40-200
Humedad	31,0	Hg	1-50
Fracción inertes	26,9	Co	3-10
PCI	**Kcal/kg**	As	2-5
PCI (útil)	2.050	Cd	1-150
Contaminantes orgánicos	**µg/kg**	Pb	100-2.000
		Zn	400-1.400
PCB's	200-400	V	4-11
Dioxinas y furanos	0,05-0,15	Ni	30-50
		Mn	20-250
		Th	< 0,1

gía entrada en la planta será mayor y esto es incompatible con el diseño, así que el resultado es que no podrá admitir tanto RSU). La Tabla 11.39 muestra la composición típica de un RSU, con sus apartados tradicionales:

- Composición de las fracciones.
- Análisis inmediato (también llamado racional).
- Análisis elemental.
- Análisis de contaminantes.

A partir del análisis elemental y aplicando la fórmula de Dulong se puede calcular fácilmente el PCI del RSU. El denominado PCI útil, que es, en la práctica, el valor necesario para efectuar los cálculos, se calcula restando del PCI (que siempre está referido a la base seca) el calor de evaporación del agua de humedad. Así el PCI útil equivale al PCI en base húmeda.

El término fracción inerte a veces puede inducir a errores. Por inertes se entiende aquellos elementos que no aportan calor a la combustión. En la tabla anterior serían los metales, el vidrio y parte de los denominados «otros». Después de la combustión, una parte de los llamados combustibles, como el papel dejan una cantidad de cenizas (debido a las cargas que contiene en su composición), o la materia fermentable da lugar a cenizas por los huesos presentes.

Desde el punto de vista de los contaminantes, se debe distinguir entre:

- Contaminantes orgánicos, que si la postcombustión es correcta quedarán completamente eliminados, si bien dejará como contaminante secundario, en cantidades ínfimas, el cloro (producto de la descomposición de los propios alimentos y de los organoclorados).
- Los contaminantes inorgánicos, fundamentalmente constituidos por metales. Después de la incineración, una parte de ellos permanecerá en las escorias y otra parte en las cenizas volantes que se deberán retener en el filtro de mangas.
- Finalmente existen los halógenos y el azufre que dan lugar a gases ácidos. En la etapa de tratamiento de gases se neutralizan y las sales resultantes también se retienen en el filtro de mangas.

4.2. TIPOLOGÍA DE LOS INTEGRANTES DE LOS RSU

La composición de los residuos y la problemática que los residuos tóxicos ocasionan han propiciado la recogida selectiva en origen para obtener residuos limpios que se puedan reciclar fácilmente.

4.2.1. La recogida de residuos

Los residuos en España son recogidos separadamente o de manera selectiva en la calle, siendo las fracciones más habituales:

- Papel y cartón.
- Envases.
- Vidrio.
- Materia orgánica (fermentable).

Esta distinción hace referencia a las fracciones que separan los propios ciudadanos en sus casas y que depositan en contenedores específicos para cada una, ubicados en la calle en las llamadas áreas de aportación de residuos. Esta recogida está implantada en casi todo el territorio nacional.

Hay, en cambio, toda una serie de residuos que debido a su toxicidad o tamaño deben ser gestionados aparte, para los que la municipalidad crea los llamados puntos limpios, ver esquema en la Figura 11.23. Estos son instalaciones de recogida de re-

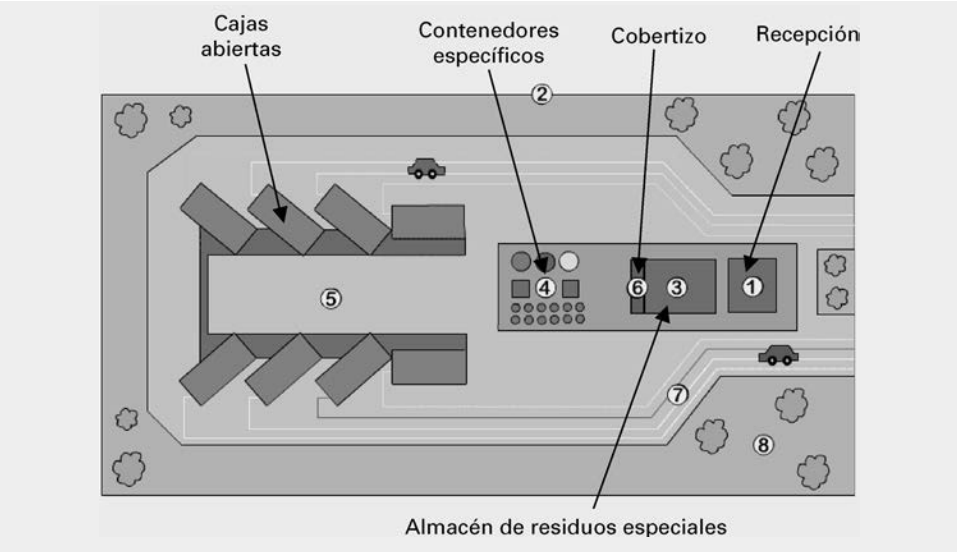


Figura 11.23. Esquema de un punto limpio y sus diferentes áreas.

siduos tóxicos donde los ciudadanos, en ningún caso empresas o industrias, pueden depositar sus residuos para que sean tratados de la manera adecuada. La mayoría de estos residuos están especificados en la Tabla 11.40, que hace referencia al «punto limpio» de Majadahonda (Madrid).

La presencia de puntos limpios en casi todo el territorio no evita que igualmente gran parte de estos residuos no sean canalizados adecuadamente y vayan a parar al cubo de la basura doméstica que será posteriormente recogido y tratado. La aportación de estos residuos a los puntos limpios, allí donde los hay, es algo absolutamente voluntario y aunque el proceso de concienciación de la sociedad se ha venido realizando en los últimos 5-10 años en España y aún puede mejorar, no se puede obviar que en países con mucha mayor tradición en estos temas, como Alemania o Austria, no han logrado que los ciudadanos lleguen a separar correctamente sus residuos.

Los residuos peligrosos urbanos son los materiales que por su corrosividad, toxicidad u otras características están tipificados por la ley como peligrosos, y que se determina que deben ser gestionados de manera específica para evitar que supongan un riesgo para el medio ambiente y la salud.

La Tabla 11.41 muestra las toneladas de RSU recogidas en el área metropolitana de Barcelona por tipo de residuos. Cabe resaltar el porcentaje del total de residuos que ha sido recogido de manera selectiva y el total de rechazo, que incluye la mezcla de todos los residuos que no han sido seleccionados. Esto es clave para valorar las cantidades de residuos recogi-

Tabla 11.40. Tipología y cantidades de residuos admitidos en puntos limpios

Tipo de residuos	Cantidad máxima dmitida persona/día	Observaciones
Aceite de motor	10 litros	Procedentes de vehículos de uso particular
Aceite vegetal	10 litros	De producción doméstica
Aerosoles	10 unidades	De producción doméstica
Baterías	2 unidades	Procedentes de vehículos de uso particular
Escombros	60 kilos	Procedentes de obras en domicilios particulares
Electrodomésticos	2 unidades	De producción doméstica
Frigoríficos	1 unidad	De producción doméstica
Fluorescentes	3 unidades	De producción doméstica
Jardinería	(Sólo Majadahonda)	Césped, setos, arbustos y pequeñas podas domésticas
Maderas	60 kg o mueble de peso superior	Embalajes y carpintería
Medicamentos	5 kilos	Sólidos, de producción doméstica
Metales		Somieres, tubos, etc.., de producción doméstica
Ordenadores	1 unidad	
Papel-cartón		De producción doméstica
PVC		De producción doméstica
Pilas		De producción doméstica
Pinturas	5 kilos	De producción doméstica
Plásticos		Envases, bolsas y objetos
Radiografías		De producción doméstica
Termómetro	2 unidades	De producción doméstica
Vidrio		De producción doméstica

Tabla 11.41. Esquema de un punto limpio y sus diferentes áreas

Materia orgánica (fermentable)	47.356 t
Vidrio	32.989 t
Papel y cartón	52.654 t
Envases ligeros	15.510 t
Residuos voluminosos (muebles y electrodomésticos)	59.425 t
Poda y jardinería	17.653 t
Pilas	208 t
Medicamentos	122 t
Textil	372 t
Otros residuos de la recogida selectiva	26.333 t
Total recogido selectivamente	252.622 t
Rechazo	1.154.468 t
Generación	1.407.092 t
% recogida selectiva vs total	17,9

dos selectivamente, que no son un reflejo fiel de las cantidades producidas sino de la implantación en el territorio de los sistemas de recogida selectiva y de la voluntad de los ciudadanos.

4.2.2. Aceites de fritura usados y grasas

España es unos de los países de la UE que genera mayor cantidad de residuos a partir de los aceites de fritura, concretamente del orden de 750.000 t/año, de los cuales el 70% se producen en los hogares y el resto en el sector de la hostelería. Por otra parte, la industria agroalimentaria genera así mismo grandes cantidades de aceites y otras grasas que podrían ser tratadas conjuntamente para la producción de biocarburantes.

Se da la circunstancia que mientras el biodiesel es biodegradable, el aceite de cocina no lo es y, además es tóxico (de ahí que el Reglamento Europeo 1831/2003 prohíba la utilización de estos aceites para la elaboración de piensos destinados a la alimentación de animales), y como que su principal vía de gestión es el vertido a cauce público, ello provoca un grave problema en las depuradoras.

Las grasas animales, más concretamente el sebo de vaca, puede usarse como materia prima para la transesterificación para la obtención del biodiesel. Este residuo tenía diversas aplicaciones pero después de la aparición de la EEB (enfermedad de las vacas locas) la tendencia se ha decantado a la valorización para la fabricación de biocarburantes. En España, a finales de 2005 había como una docena de plantas destinadas a la elaboración del biodiesel.

La Directiva 2003/30 relativa al fomento de los biocarburantes establece que:

- A finales de 2005, en todos los estados miembros, el 2% del carburante deberá ser de carácter renovable.
- Para finales de 2010 esta cifra deberá alcanzar el 5,75% y el 15% en 2020.

Ambos, aceites y grasas animales y vegetales (mejor estas últimas para transformarlas) están constituidos por triglicéridos, ésteres de una molécula de glicerina y tres de ácidos grasos que puestos en contacto con el metanol (reacción de esterificación) da lugar a un éster metílico o biodiesel. El Capítulo 4 de esta obra dedica un extenso apartado a esta especial problemática.

4.2.3. Los residuos fermentables

Los residuos degradables se podrían clasificar, en primera aproximación, en:

- *Residuos de rápida degradación:* Residuos de comida, residuos de jardín, papel y en menor proporción el cartón.
- *De lenta (a veces nula) degradación:* plásticos, gomas, cueros, maderas, etc.

Dentro de los llamados residuos orgánicos existe una infinidad de variedades de las que convendría llevar a cabo una breve clasificación.

- *Residuos fácilmente fermentables:* Denominados «*soft organics*» en terminología inglesa, son la FORM estrictamente. Corresponden a aquellas estructuras en que el principal componente celular es el agua, es decir, los vegetales: frutas, verduras y restos de jardín (en particular los de césped), hojas y raíces.
  A lo largo del tiempo se establece una interacción entre el agua celular y la de humedad, así, al iniciarse el proceso de descomposición, el agua de constitución se transforma en agua de humedad. Esto mejora los parámetros de compostaje, si bien empeoran las condiciones de transmisión de patógenos. Todos ellos presentan ciertas dificultades para su compostaje derivadas de la pérdida de humedad que deben ser superadas mediante las condiciones de operación, recirculación de los lixiviados o adición de agua.

- *Residuos difícilmente degradables:* También llamados «hard organics» en terminología inglesa. Técnicamente son aquellos en que la relación de agua celular con respecto la masa total es muy inferior a los anteriores. En los procesos de compostaje prácticamente no dan lugar a lixiviados y desprenden pocos COV's (que se traducen en malos olores), si bien precisan agua externa para el proceso. Ejemplos típicos de este grupo son los restos de poda incluyendo hojas frescas.
- *Materiales celulósicos:* La estructura celular de estos materiales está formada básicamente por lignina y/o celulosa y contienen poca agua celular. Muchos de ellos presentan una descomposición muy lenta o casi nula en presencia de bacterias. Ciertos hongos producen una rápida fermentación pero esta clase de microorganismos no resiste bien la temperatura.
  A veces es un buen complemento para los fácilmente degradables, ya que retienen la humedad que les sobra a aquellos. A esta clase pertenece la paja, restos de madera, papel, hojas secas, etc.
- *Residuos de animales:* Los residuos ricos en proteínas se descomponen rápidamente. Así, la sangre de animales, los productos lácteos o los restos de aves se degradan con gran rapidez. Sin embargo el proceso desprende muy mala olor y las sustancias generadas pueden inhibir los procesos de compostaje, por esta razón solo debe ser tratados en los sistemas de digestión anaerobia.
- *Residuos de deyecciones humanas y del ganado:* En primer lugar debería hacerse una distinción previa entre los residuos procedentes de animales carnívoros y los herbívoros. Los primeros, donde hay que incluir los procedentes de los humanos, contienen gran cantidad de gérmenes patógenos y organismos parasitarios. Desde el punto de vista de los residuos a este grupo corresponden los fangos de las depuradoras urbanas (EDAR) que si bien son una buena fuente de nitrógeno y materia orgánica, suponiendo que estén exentos de metales pesados, hay que garantizar su higienización para el posterior uso.
  Los residuos procedentes de los animales herbívoros son bien diferentes a los anteriores, pues contienen muy pocos agentes patógenos y parásitos, por lo que constituyen una buena fuente de nitrógeno para el compost. Por otra parte, su contenido proteico no es lo suficientemente importante como para generar malos olores. Desde el punto de vista del reciclaje el problema que presentan es su consistencia acuosa, en parte motivada por los sistemas de recogida, que recuerda un fango primario de EDAR.
- *Los residuos sólidos urbanos:* Son de hecho una mezcla de residuos en los que, en mayor o menor cantidad, se hallan presentes todas las tipologías antes descritas.

Las características de la fracción orgánica de los residuos municipales son función de multitud de factores y varían de un municipio a otro, de una estación a otra y hasta entre barrios de una misma ciudad, por lo cual es difícil establecer unos estándares.

La Tabla 11.42 reproduce el análisis inmediato tipo de algunas de las fracciones fermentables más comunes presentes en los RSU. El análisis inmediato caracteriza los residuos según:

- La humedad.
- La materia volátil que es la que proporciona una idea de la biodegradabilidad.
- El carbono fijo.
- La cantidad de ceniza, o materia no combustible.

El análisis inmediato, expuesto en la Tabla 11.42, tiene mucho que ver con la lógica de la solución final que debería aplicarse a la gestión de los RSU.

Tabla 11.42. Análisis inmediato típico (en %) de fracciones fermentables de los RSU.

Residuo	Humedad	Materia volátil	Carbón fijo	Cenizas
Grasas	2	95,3	2,5	0,2
Restos comida mezclados	70	21,4	3,6	5
Restos de frutas	78,7	16,6	4	0,7
Restos de carne	38,8	56,4	1,8	3,1
Cartón	5,2	77,5	12,3	5
Revistas	4,1	66,4	7	22,5
Papel periódico	6	81,1	11,5	1,4
Cartones encerados	3,4	90,9	4,5	1,2
Plásticos mezclados	0,2	95,8	2,0	2,0
Textiles	10	66	17,5	6,5
Goma	1,2	83,9	4,9	9,9
Cuero	10	68,5	12,5	9,0

4.3. LA RECOGIDA SELECTIVA

Según datos oficiales del Ayuntamiento de Barcelona (censo oficial en 2005, 1.593.075 personas), la generación de RSU fue de la siguiente manera:

- Recogida a granel (fracción resto, o todos uno): 605.029 t/año
- Recogida selectiva: 253.838 t/año

Esta cifra, según las mismas fuentes, procede de:

- Recogida domiciliaria: 666.957,6 t/año
- Recogida comercial: 47.061,o t/año
- Recogida en mercados: 21.826,4 t/año
- Puntos verdes: 15.598,7 t/año
- Voluminosos: 31.267,3 t/año
- Otras recogidas: 76.156,6 t/año

Esta última recogida de «otras fracciones» incluye conceptos no incluidos en los otros apartados como animales muertos. Es decir, la generación total fue de 858.867 t/año (539 kg/habitante y año, o 1,47 kg/habitante y día. Mientras que en la Comunidad de Cataluña, la media fue de 1,66 kg/habitante y día), lo que supone un ratio de recogida selectiva del 29,5%.

Tal y como se ha ido comentando a lo largo de este capítulo destinado a los RSU, la recogida selectiva constituye el único medio eficaz para el reciclaje de las diversas fracciones que se hallan en los residuos. La Ley 10/1998 obliga a llevar a cabo la recogida selectiva en los municipios de más de 5.000 habitantes. Sin embargo, la forma de realizarla es variada y depende de factores como:

- *Presupuesto disponible* (es preciso adquirir los contenedores y los camiones necesarios, así como construir los centros de acopio).
- *La logística y el clima.* Hay que estudiar y determinar que fracciones se desea recoger selectivamente. Ello determina la frecuencia de la recogida.
- *El urbanismo.* En los municipios de gran extensión y poca densidad de población, el coste de la implantación de la recogida selectiva es mucho mas elevada que en las poblaciones densamente pobladas. Por el contrario en éstas no es factible, a veces, llevar a cabo la recogida por problemas de espacio físico o de tráfico (los contenedores ocupan mucho espacio).
- *Factores socioeconómicos.* La recogida selectiva obliga a guardar en la propia vivienda, en bolsas de cierto tamaño, las diversas fracciones que se deben reciclar. Con frecuencia hay hogares que no tienen espacio adecuado para ello. Hay ciudadanos que opinan que ya pagan bastantes impuestos y no quieren más problemas que no «son de su competencia».
- *Factores culturales.* Los contenedores, al margen de su estética, en épocas de calor huelen y ello desata las protestas de los vecinos. A la vez, hay ciudadanos que no quieren acarrear con los residuos mucho trecho. También hay quejas de vecinos por el ruido de los camiones. Otros protestan porque algunos contenedores rebosan y ensucian las aceras. Finalmente muchos contenedores son victimas del gamberrismo.
- *La forma de la recogida*. Se puede llevar a cabo con contenedores en la calle, en áreas de aportación (por lo general plazas), en los puntos limpios, o bien una variante denominada «recogida puerta a puerta» (esta es práctica habitual en comunidades pequeñas).

Vale la pena hacer un comentario sobre la «recogida puerta a puerta» ya que desde el punto de vista de la recuperación es, con diferencia, la que arroja mejores resultados, pudiéndose llegar al 85% de efectividad. Para urbanismo horizontal y poblaciones pequeñas, un modelo podría ser:

- Recogida fermentable 3-4 veces/semana.
- Recogida vidrio, papel 1 vez/semana (o bien situar contenedores en las calles)
- Inorgánico o rechazo 1 vez/semana.
- Peligrosos: punto limpio.

Se precisa tener plantas de reciclaje, previo paso por plantas de triaje y selección, en el entorno: para fermentable, vidrio, etc.

Todo ello da lugar a un sinfín de combinaciones. La Tabla 11.43 muestra los ratios estándar para establecer una planta de triaje a partir de los valores individuales de productividad en modalidad de selección manual (las cifras pueden oscilar bastante si, por ejemplo, el material está limpio o hay poca cantidad de una fracción determinada, etc.). En el caso de los metales no aparecen cifras puesto que se supone que se hace de forma automática.

Hay ciudadanos que están completamente de acuerdo con la recogida selectiva, aunque para ello deban instalarse los contenedores en la calle pero hay otros colectivos que creen que es inaceptable «traer la basura al centro de la ciudad». Finalmente la mayoría de la ciudadanía ignora lo que paga por el servicio y, muy pocos saben de que lo que pagan no cubre el coste real del servicio.

Tabla 11.43. Ratios estándar para una planta de selección

Fracción	Densidad aparente kg/m³	Recogida kg/habitante
PET	23	160
Papel	80	12
Cartón	90	100
PVC	25	240
Vidrio	350	500
Plástico film	20	20
Textiles	60	180
Metales ferrosos	45	
Metales no ferrosos	25	

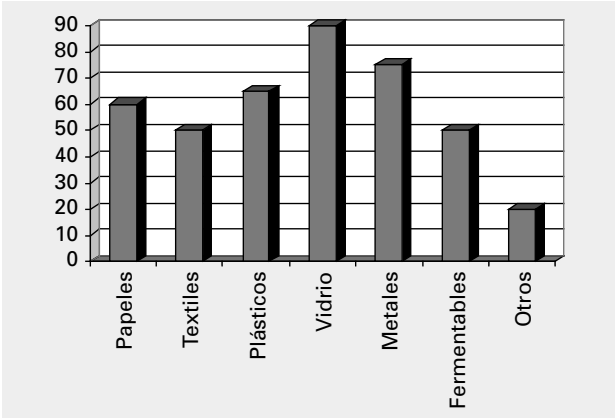


Figura 11.24. Potencial de reciclabilidad de los RSU.

4.3.1. Fracciones potencialmente reciclables

A partir de 1992, cuado entró en vigor la Ley de Envases y Embalajes, se comenzaron a realizar estudios para estimar la cantidad de RSU que potencialmente se podría recoger selectivamente. Un compendio de ellos es el que aparece en la Figura 11.24.

De acuerdo con esta figura, que corresponde a valores máximos teóricos, es posible construir la Tabla 11.44 donde se aplican estas cifras a un caso real de recogida, como, por ejemplo, la ciudad de Barcelona.

Según expone la Tabla 11.44, en el área de Barcelona se producen del orden de 539 kg de RSU por persona y año. En la primera columna de la tabla aparecen las cantidades de las fracciones que se generan y son susceptibles de ser recogidas selectivamente. En 2005, en la ciudad de Barcelona había contenedores para recoger selectivamente:

- Papel y cartón.
- Envases ligeros que, a efectos de cálculo, engloba el plástico, el acero y el aluminio.
- El vidrio.
- La fracción fermentable (en 2005 solo había dos barrios de la ciudad con recogida de fermentables. No obstante, como que se trata de hacer un ejercicio para calcular la máxima cantidad que se puede recoger de manera selectiva, se supone que se puede extender a toda la ciudad).

Tabla 11.44. Cantidad máxima potencial a recoger selectivamente

Cantidad generada: 539 kg/habitante y año			
	Kg/año	% máximo de recogida	kg/año recogidos
Papel	178	60	107
Envases ligeros	81	50	40
Vidrio	54	70	38
Fermentables	108	25	27
No existe recogida	119	0	0
Total	**539**		**212**
% máximo teórico de recogida selectiva		39	

NOTA: Si el lector compara estos valores con la composición del RSU del área metropolitana de Barcelona que aparece en la Tabla 11.7, se dará cuenta que las cifras no cuadran. La explicación es la siguiente: Los datos máximos teóricos de recogida selectiva hacen referencia a estudios de principios de los años 1990, donde casi ningún país tenía implantada la recogida selectiva, por eso se ha preferido tomar de referencia la caracterización de la Tabla 11.39, que corresponde a un RSU de la misma época.

Aplicando los porcentajes máximos de recogida (columna central, que depende de muchos parámetros pero el parámetro indicado da una media aceptable), se obtiene la última columna donde se indica la cantidad máxima total que, en teoría, se puede recoger. En el ejemplo citado es de 212 kg, lo que supone un 39% de los residuos generados. Esta cifra es teórica. La cifra real en 2004 no llegó a la mitad, y en las ciudades centroeuropeas donde la recogida selectiva se instauró hace más de 20 años y se llevaron a cabo grandes campañas de concienciación, se ha llegado a valores del 30%-35%. También hay que hacer la advertencia que los datos más importantes, primera columna de la Tabla 11.44, han sido promediados ante la imposibilidad de saber realmente las diversas fracciones de cada partida.

Dando por bueno el límite del 35% y volviendo al caso de Barcelona, la cantidad de rechazo será del 65%, lo que equivale a 350 kg de RSU por persona y año. Ello indica que se debe ir pensando en adoptar sistemas de tratamiento o valorización para este rechazo.

4.3.2. Medios para llevar a cabo la recogida selectiva

En el anterior apartado se habían calculado las cifras razonables que se pueden llegar a recoger de manera selectiva. La Tabla 11.45 establece, para la ciudad de Barcelona, las cantidades de recogida selectiva.

De acuerdo con la Tabla 11.45, la recogida selectiva alcanzaría el 28%, cantidad razonable y próxima al máximo teórico real del 35%.

Tabla 11.45. Cantidades unitarias de recogida selectiva

HIPÓTESIS RAZONABLE DE RECOGIDA SELECTIVA Cantidad generada: 539 kg/habitante y año			
	Kg/año	**% real de recogida**	**kg/año recogidos**
Papel	178	55	98
Envases ligeros	81	20	16
Vidrio	54	50	27
Fermentables	108	10	11
No existe recogida	119	0	0
Total	**539**		**152**
% máximo teórico de recogida selectiva		28	

De acuerdo con estos valores unitarios, la Tabla 11.46 establece de conformidad con la población real las cantidades absolutas que se pueden recoger de fracciones selectivas y finalmente, el número de contenedores necesarios. Las columnas que aparecen sombreadas son cifras medias estimadas por el autor (combinando la frecuencia de recogida, se altera el número de contenedores por habitante). No obstante, obsérvese que la cifra teórica de material recogido selectivamente coincide bastante con la cantidad real recogida en 2005.

Finalmente es preciso hacer dos observaciones sobre la recogida selectiva:

- Desde el punto de vista técnico, existen una serie de limitaciones. Así, en el caso del vidrio no se admiten bombillas, cerámicas, etc.
- Desde el punto de vista económico, y siguiendo con el caso del vidrio, el camión cargado con vidrio recuperado debe dirigirse a un gestor que lo clasifica. El vidrio, ahora desclasificado como residuo, va a una vidriera y el rechazo (caso de haberlo) a una planta de tratamiento.

Los datos oficiales de la Memoria de la Entidad Metropolitana de Medio Ambiente de Barcelona, arroja las siguientes cifras, provisionales, en los años 2003 y 2004:

- Papel y cartón: 58.894 toneladas recogidas, lo que supone un contenedor para cada 481 habitantes y 19,2 kg por habitante (23,28 kg en 2004).
- Envases ligeros: 20.420 toneladas recogidas, lo que supone un contenedor para cada 529 habitantes y 8,3 kg por habitante.
- Vidrio: 35.531 toneladas recogidas y 11,6 kg por habitante (12,2 en 2004).
- En cuanto a la materia orgánica el total fue de 115.594 toneladas, repartidas de la siguiente manera: domiciliaria: 54.028 toneladas, grandes generadores: 39.504 toneladas y restos vegetales: 22.063 toneladas. (43,12 kg por habitante en 2004).
- Voluminosos, básicamente en puntos verdes: 62.311 toneladas.

A pesar de que los criterios de ubicación de contenedores se pueden y deben modificar en función de

Tabla 11.46. Cálculo de los contenedores precisos

CÁLCULO DE CONTENEDORES Población servida: 1.593.075 habitantes Cantidad recogida selectivamente: 253.838 t/año						
	t/año	**t/contenedores**	**Contenedores/año**	**Recogidas/año**	**Contenedores**	**Hab./año**
Papel	155.848	1,1	141.680	200	708	2.249
Envases ligeros	25.760	1,0	25.760	100	258	6.148
Vidrio	42.933	1,5	28.622	100	286	5.566
Fermentables	17.173	0,9	19.081	50	382	4.174
Total selectivo					**1.634**	**975**

los resultados obtenidos, como puntos de partida se pueden señalar los siguientes factores:

- La población por contenedor ha de ser entre 4.000 y 5.000 personas, como máximo.
- La distancia máxima del contenedor al usuario ha de ser del orden de 500 metros.
- Es conveniente ubicar los contenedores en áreas muy próximas a supermercados, bares y restaurantes ya que son puntos de gran producción de residuos.

4.3.3. Resultados reales de la recogida selectiva

Según datos oficiales de 2004, la recogida selectiva, por fracciones en la propia ciudad de Barcelona fue la siguiente:

- Materia fermentable: 34,1% (94.935 t/año, o 59,6 kg/ hab. año).
- Papel y cartón: 28,1% (71.328 t/año, o 44,7 kg/ hab. año).
- Vidrio: 9,3% (23.606 t/año, o 14,8 kg/ hab. año).
- Envases ligeros: 5,0% (12.692 t/año, o 7,96 kg/ hab. año).
- Otros (voluminosos, ropa, etc.): 13,8% (35.029 t/año, o 21,9 kg/ hab. año).

Si ahora se comparan estas cifras, reales, con las del ejercicio teórico efectuado en la tabla 11.45, se observan las siguientes anomalías:

- Material fermentable: 59,6 kg/ hab. año, contra los 11 teóricos. Esta recogida, tal como se hace hoy en día no sirve para nada ya que con ella se hace el denominado «compost gris» cuyo destino es el vertedero. En conclusión, sería más razonable, y barato, recoger menos fracción fermentable pero bien hecha de forma que permitiese hacer un compost que, al menos tuviese aplicación en jardinería.
- Papel y cartón: 44,7 kg/ hab. año, contra 98 teóricos, lo que indica, al contrario del caso anterior que debería potenciarse esta recogida.
- Vidrio: 14,8 kg/ hab. año, contra 27 teóricos. Hay que aplicar el mismo criterio que en el caso anterior.
- Envases ligeros: 7,96 kg/ hab. año, contra 16 teóricos, es decir lo mismo que en los casos anteriores.

En conclusión, la verdadera recogida selectiva es la que se lleva a cabo en las fracciones de papel, cartón, vidrio y envases ligeros. La cifra total de estas 67,46 kg/hab. y año, se halla muy alejada de las posibilidades teóricas: 152 kg/hab y año, sin tener en cuenta la fracción fermentable. Estos comentarios dan una idea de la complejidad de la recogida selectiva. A todo ello habría que añadir que esta recogida selectiva debe pasar a los centros de selección de donde se separa una fracción de impropios que, en muchas ocasiones, es muy importante.

De acuerdo con la memoria de actividades de la Agencia de Residuos de Cataluña (Departamento de Medio Ambiente del Gobierno de la Comunidad Autónoma) correspondiente al año 2005, para una población de casi 7.000.000 de habitantes, la generación de RSU fue de 4.188.062 t, lo que supone una producción unitaria de 1,663 kg/habitante y día, cuya gestión fue:

- Vertedero: 56,1%.
- Recogida selectiva: 26,2%.
- Incineración: 17,6%

La citada memoria muestra la evolución, en términos absolutos, de la generación de residuos desde 1995 (donde la producción de RSU era de 2.800.000 t/año) hasta el 2005 y la conclusión que puede extraerse es que:

- Las cantidades de RSU, en cifras absolutas, que se han tratado por incineración y vertido se han mantenido sensiblemente constantes a lo largo de la década.
- El incremento en la generación de RSU se ha absorbido con la recogida selectiva. Sin embargo ello no significa que se recicle el cien por cien de esta cifra. Una parte muy considerable corresponde al agua que se evapora durante el proceso de compostaje de la fracción fermentable y otra parte importante constituye el denominado rechazo o fracción resto, es decir las partes no aprovechables de la recogida selectiva.

4.4. LOS PUNTOS VERDES O PUNTOS LIMPIOS

El Punto Verde o Punto Limpio es el centro de recepción y almacenamiento selectivo de los residuos municipales que no son objeto de recogida domiciliaria. Su objetivo primordial es recuperar y reciclar al máximo los residuos que hayan sido depositados

por los ciudadanos, las pequeñas empresas y los comerciantes. En un Punto Verde se pueden llevar materiales, tanto reciclables como los que por sus características se consideran especiales.

Los residuos que no se recogen con una periodicidad regular, a pesar de la presencia de ciertos residuos atípicos sea significativa en el conjunto (por ejemplo los pañales), no es viable programar la recogida selectiva mediante servicios programados y regulares. Ahí es donde cobra fuerza la existencia de los puntos limpios.

En los puntos limpios no se llevan materias orgánicas (excepto aceites vegetales y restos de pan seco), ya que aquellas siguen otro proceso de reciclaje diferente (en las plantas de compostaje). Tampoco deben llevarse materiales que puedan ser considerados peligrosos como, por ejemplo, explosivos, residuos sanitarios o radioactivos, determinadas sustancias químicas o cualquier recipiente que haya contenido materiales peligrosos.

En los puntos limpios, los residuos se clasifican entre los considerados peligrosos (tubos fluorescentes, pilas, etc.) que se acondicionan y se llevan a las plantas de tratamiento y/o valorización y aquellos residuos que, siendo asimilables a los RSU, no se pueden reenviar directamente, como los voluminosos, que precisan de un tratamiento de reducción previo.

Los puntos limpios son lugares que reciben residuos tóxicos y peligrosos por lo que deben ser gestionados por gestores autorizados. De hecho el tipo de autorización depende de cada Autonomía. Por lo general, cada Punto Verde es administrado por un gestor local, el cual cuenta con la colaboración de un gestor logístico común, que se encarga de trasladar los materiales recogidos en los diferentes Puntos Verdes a los centros de tratamiento especializado. El Punto Verde es solamente un lugar de paso de estos residuos, que continuarán después su proceso de reciclaje.

Según la ley que regula los residuos en Cataluña, todos los municipios de más de 5.000 habitantes deberían tener un Punto Verde propio. Se prevé que en 2006 haya 42 en todo el área metropolitana de Barcelona y que se disponga, como mínimo, de una instalación por población. El Punto Verde es una herramienta que permite a los ciudadanos colaborar en el respeto y la mejora de la calidad medioambiental. Es un servicio gratuito del que disponen los ciudadanos para aportaciones de hasta 500 kg. El comerciante y las pequeñas empresas pagan unas tasas en función de la cantidad de materiales que depositan.

Según datos oficiales extraídos de la memoria de Actividades del Área Metropolitana de Barcelona, en 2004, en todos los Puntos Verdes se recogieron: 12.100 t de madera, 87 t de pilas, 25,7 t de tubos fluorescentes, 97,2 t de aceites vegetales, 47,1 t de aceites minerales, 142,9 t de neumáticos, restos de poda 3.605 t, 148 t de baterías, 715 t de material informático, 86,9 t de electrodomésticos de línea blanca, 272 t de aparatos con CFC, etc.

La instalación básica de un Punto Limpio estriba en la colocación de una serie de contenedores, de diferente tamaño, en forma de diente de sierra, de manera que el ciudadano pueda depositar sus residuos en el contenedor señalado. Con el fin de tener una instalación ordenada y acorde con el medio ambiente limpio, estas plantas deben contar con una serie de requisitos:

- Estar integradas en el entorno para minimizar el impacto del tráfico, los ruidos y los olores. Para ello deberían crearse pantallas vegetales en su perímetro, rematadas por una valla que impida el acceso en horas fuera de servicio.

Tabla 11.47. Materiales admitidos en un Punto Verde estándar

Materiales o elementos directamente reutilizables	Muebles, utensilios domésticos y otros trastos, electrodomésticos línea blanca, electrodomésticos línea marrón, textiles, zapatos, botellas de cava.
Materiales recuperables	Aparatos de ofimática, cables eléctricos, electrodomésticos línea blanca, electrodomésticos línea marrón, poda, chatarra, madera, metales, muebles, aceite vegetal, papel, pan seco, radiografías, ropa/calzado, vidrio de construcción, otros.
Envases especiales	Botellas PE, botellas PET, botellas PVC, tetrabrics, cartón, latas férricas, latas de aluminio, papel plástico (film), porexpan, residuos especiales, vidrio transparente, vidrio de color, otros.
Residuos peligrosos	Aerosoles, baterías, ceras/betunes, colas/adhesivos, cosméticos, disolventes, fluorescentes y lámparas de vapor de mercurio, laboratorio escolar, líquidos de fotografía, latas de aceite mineral, neveras/aparatos con CFC, aceite mineral, pesticidas, pilas, pinturas acrílicas, pinturas disolventes, neumáticos, productos para coches, productos de limpieza, termómetros o aparatos que contengan mercurio, tóners no identificados.
Inertes	Escombros.

- Realizar accesos separados para ciudadanos y servicios. También establecer una sola circulación de vehículos.
- Señalización visible y clara donde se indique el horario y los tipos de residuos admitidos.
- Oficina y diversos sistemas de infraestructura básica.

En algunos Puntos Limpios, se organizan visitas guiadas para escolares en todas estas instalaciones dentro del programa de educación ambiental.

4.5. LOS ECOPARCS

La etimología de la palabra «ecoparc» procede de la de «ecoparque» usada en la ecología industrial para definir un macro polígono industrial donde los residuos generados por una industria puedan ser aprovechados por otra y la energía también. Se podría decir que los «ecoparques» son núcleos industriales productivos diseñados para que el resultado de la gestión de residuos sea lo más parecida posible a instalaciones de residuo cero.

En el mundo de los RSU, el Ecoparc es un complejo de tratamiento que combina en un mismo recinto varias instalaciones para valorizar los diferentes tipos de residuos. Se ha convertido en una infraestructura clave para el éxito del PMGRM (Programa de Gestión de Residuos Municipales, del Gobierno Autónomo de Cataluña), al mismo tiempo que supone la implantación de un nuevo sistema de gestión de los residuos basado en criterios de sostenibilidad.

Tabla 11.48. Características de los ecoparcs de Barcelona

	Barcelona	Montcada i Reixac	Mediterráneo
Superficie, Ha	6	8	1,1
Capacidad de tratamiento (t/año)	300.000	240.000	260.000
Producción biogás (millones m^3/año)	14	12,6	12
Producción electricidad (MWh/año)	22.000	16.000	11.000
Producción compost (t/año)	56.000	38.000	40.000
Subproductos recuperados (t/año)	18.000	23.000	29.700

Las características más significativas de los ecoparcs del área metropolitana de Barcelona se detallan en la Tabla 11.48.

El Ecoparc de Barcelona, situado en la Zona Franca, ha sido diseñado como el primer equipamiento ambiental para el tratamiento integral de los residuos municipales del área metropolitana de Barcelona. El Ecoparc está gestionado por la sociedad Ecoparc Barcelona S.A., de capital mixto, formada por la UTE de empresas privadas 80 (%) y municipales (20%).

La inversión en este equipamiento, inaugurado en 2003, ha sido de 56 millones de euros, incluyendo el sistema de selección óptica de bolsas (Optibag), de los cuales 19.162.665 € han sido aportados por la UE.

La función del Ecoparc de Barcelona es valorizar la fracción orgánica y el resto (rechazo), a través de

Figura 11.25. Vista del Ecoparc de Barcelona.

varios tratamientos complementarios como la selección y separación de materiales recuperables, el compostaje y la metanización. Así, tiene como objetivos generales:

- Maximizar la producción de biogás y el compost de alta calidad.
- Minimizar el rechazo final, así como la parte orgánica que contiene.
- Gestionar y tratar los residuos con el máximo cuidado hacia el entorno.

La planta tiene una capacidad de tratamiento de 300.000 toneladas de residuos anuales, aproximadamente una cuarta parte del volumen total de residuos que se generan en el área metropolitana. Al estar integrada en un entorno industrial, se ha tenido especial cuidado en el tratamiento y desodorización del aire incorporando biofiltros y en la depuración del agua con una red integrada de recogida de lixiviados y un sistema de tratamiento biológico que depura las aguas residuales.

La tecnología utilizada en este Ecoparc es, en cuanto a la biometanización y compostaje, de Linde KCA. Los procesos que se llevan a cabo en esta instalación son: selección y pretratamiento, metanización, cogeneración y compostaje. La fase de selección se ha potenciado con la incorporación del sistema OptiBag, que distingue las bolsas según su color mediante unos lectores ópticos. Este sistema se utiliza para los residuos que provienen de la recogida neumática que realiza el ayuntamiento de Barcelona en algunos barrios.

La materia orgánica separada adecuadamente en origen se fermenta en el Ecoparc en 38 túneles de compostaje. Es precisamente en este punto donde radica uno de los grandes problemas de la gestión de los RSU. En Barcelona (2005), solo se lleva a cabo la recogida selectiva de la fracción fermentable en dos barrios. Pero en el Ecoparc se fabrica compost con el RSU «todo uno», una vez separado del rechazo, procedente de la ciudad. Obviamente este compost es de muy mala calidad, se trata de un compost gris, y su destino, hoy por hoy es el vertedero. En el proceso de compostaje existe una lógica reducción de peso.

Para la obtención de biogás, la planta cuenta con cuatro digestores de 6.700 m^3 de capacidad, donde durante unos 20 días se fermenta la materia orgánica a 37 °C y se obtiene biogás, constituido por metano y dióxido de carbono a partes iguales. Este biogás genera electricidad y calor mediante una planta de cogeneración constituida por 5 motores Jembächer con una potencia total de 5MW. Se calcula que anualmente se obtendrán 14 millones de m^3 de biogás, que se generan a partir del tratamiento previsto de 95.000 toneladas de materia orgánica. La materia fermentable precisa para la alimentación de los metanizadores procede de la recogida selectiva de los barrios de la ciudad en que se lleva a cabo. A la llegada al Ecoparc, esta se introduce en un hidropulper, donde la FORM se tritura y homogeniza con agua.

En el metanizador, el biogás generado se emplea para alimentar los motores de cogeneración. El rechazo de los metanizadores se composta y de ahí, si resulta un compost de calidad.

La electricidad que se calcula producir es de 22 millones de kWh anuales, y cubrirá las necesidades de autoconsumo de la planta. El resto de la energía generada, el 60%, se exportará a la red eléctrica.

Cada día llegan a la instalación más de 120 camiones con más de 800 toneladas de residuos. El diagrama de flujos previsto (A finales de 2005, el balance real de masas se hallaba muy lejos del teórico diseñado. Esta anomalía también se repite en instalaciones semejantes cuando son de gran tamaño.

Figura 11.26. Vista de los metanizadores del Ecoparc de Barcelona.

Hasta el presente, la experiencia ha demostrado que este tipo de instalaciones funcionan razonablemente bien cuado la cantidad de residuo a tratar no supera las 50.000 t/año, o bien el equivalente a 100.000 habitantes. El problema no es la cifra en sí, si no que una producción pequeña equivale a una ciudad de pocos habitantes donde es posible llevar a cabo una buena educación ambiental y una caracterización del residuo recogido que redunda en una calidad razonable del material a procesar y ello es la única garantía de funcionamiento) para el Ecoparc de Barcelona una vez esté en pleno rendimiento es:

- Entradas: 300.000 toneladas de residuos equivalentes a 35.000 toneladas de materia orgánica de origen domiciliario y comercial + 250.000 toneladas de resto de residuos urbanos de los municipios que realizan la recogida selectiva + 15.000 toneladas de fracción vegetal de poda y jardinería.
- Salidas: 56.000 toneladas de compost + 14.000.000 de m^3 de biogás + 22.000 MWh de electricidad + 18.000 toneladas de productos valorizables procedentes de la selección.

Asimismo, gracias a la calidad de los subproductos recuperados, la Sociedad Ecoparc firmó en 2001 un convenio con Ecoembes para la recuperación de envases ligeros.

En Pinto, en las cercanías de Madrid, existe otro ecoparque, denominado Planta de Biometanización y Compostaje de Pinto. Entró en funcionamiento en 2003, para tratar 140.000 t/año, con una inversión de 45,5 millones de Euros, de los cuales el 80% fueron aportados por los fondos de cohesión de la UE. Tiene unas diferencias esenciales con el descrito de Barcelona:

- La materia orgánica fermentable sufre una doble tamización.
- La materia orgánica, a la salida de los digestores contiene un 90% de agua, unas centrifugadoras rebajan este porcentaje hasta el 75%.
- El digestado es esponjado por la adición de restos de poda desfibrada.

En el DVD adjunto, en el punto 7, se muestra información sobre el Ecoparc de Barcelona.

5. Sistemas de tratamiento térmico de los RSU

Los sistemas de tratamiento de los RSU más apropiados son consecuencia del tipo de residuo de partida. Tan sólo dos sistemas son generalistas y aceptan todo tipo de residuos independientemente de la «suciedad» de éstos, el vertido y la incineración. De ellos, el vertido está considerado como el último eslabón en la cadena de la gestión de residuos, entendiéndose que cuando un material residual es depositado en un vertedero es debido a que ya no contiene ningún componente de valor, ni siguiera energía. De esta manera, una gestión ideal de residuos siguiendo la Estrategia Europea de Gestión de Residuos, el documento guía para el desarrollo de las políticas de gestión de residuos que rigen en toda la normativa europea sería:

- Minimización de la producción de residuos.
- Recuperación y reciclaje de todos aquellos materiales susceptibles de ser reutilizados o reciclados, como la fracción orgánica limpia, plásticos, madera o metales. Para ello lo más apropiado es realizar recogida selectiva en origen.
- Valorización o aprovechamiento energético de los materiales que no hayan podido ser reciclados.
- Vertido de los residuos con aprovechamiento energético.

Este esquema ideal difiere bastante de la realidad, ya que en el año 2000 en España en su conjunto (en algunas comunidades, como es el caso de Cataluña, el «tratamiento inadecuado», es decir el vertido ilegal, es nulo), el vertido controlado representaba el 64%; el reciclado y recuperación (incluido el compostaje) el 14%; la incineración el 5% por ciento y quedaba un 17% por ciento sin recibir tratamiento adecuado. En cambio, en el resto de la Unión Europea, de media, el reciclaje y la recuperación representan un 16%, la incineración un 24% y el 60% restante se vierte. Esto se relaciona también con el grado de desarrollo y sensibilidad en temas de medio ambiente de los diferentes países y sus necesidades, pues se observa que Irlanda, Grecia o Portugal tienen un porcentaje de incineración prácticamente nulo,

en contraste con países como Suiza o Dinamarca, donde alcanza casi el 80%, posiblemente también influyan los problemas de espacio.

La Figura 11.27 muestra el esquema general de posibilidades de tratamiento y valorización de los RSU. La figura parte de la base de que se disponen de RSU en masa, es decir, si en el territorio hay recogida selectiva, las fracciones van por otros conductos y no aparecen en el esquema. Así pues, a grandes trazos, las vías de tratamiento y valorización de los RSU en masa serían:

- Plantas de selección y triaje, diseñadas esencialmente para fracciones de naturaleza inorgánicas recuperables: metales y vidrio. El resto estará compuesto por fracción fermentable, papel, textiles y plásticos y con ellos se puede preparar combustibles alternativos, denominados genéricamente RDF (combustible derivado del residuo, en su traducción literal del inglés). Además siempre existirá un rechazo que deberá enviarse a vertedero.
- Plantas de tratamiento biológico y bioquímicas. Como es lógico estas plantas están diseñadas para tratar una fracción mayoritariamente orgánica. Dentro de este apartado existe una serie de subdivisiones: la *digestión aeróbia* que da como resultado una mineralización de la materia orgánica y una transformación de la misma gracias a la acción de los microorganismos. Salta a la vista que el compost obtenido será de muy mala calidad (compost gris) si no existe una adecuada recogida selectiva. La *digestión anaeróbia*, metanización en el caso de los RSU, también precisa de un cierto grado de cuidado en la recogida, no por el biogás en sí, si no por la presencia de contaminantes que pueden inhibir las reacciones anaeróbias. El resultado del proceso es un biogás (energía) y un rechazo que puede comportarse.
- El *vertido* es, desde el punto de vista biológico un proceso aerobio (primera etapa del vertedero) seguido de una larga etapa donde predominan las reacciones anaerobias. Pero, a diferencia de los anteriores no es importante la presencia de materiales de bajo índice de degradación (papel, plástico) o simplemente que no se degraden como el vidrio o los metales. Por esta razón, el vertido se considera una opción de tratamiento en masa de los RSU, sin etapa de selección previa.
- Plantas de *tratamiento térmico* en las que los procesos biológicos dejan paso a los químicos, por esto se llaman termoquímicos. Tienen la ventaja, sobre los anteriores (los bioquímicos) de que pueden procesar, en un tiempo muy breve, todo tipo de materiales orgánicos, sean fermentables o no.

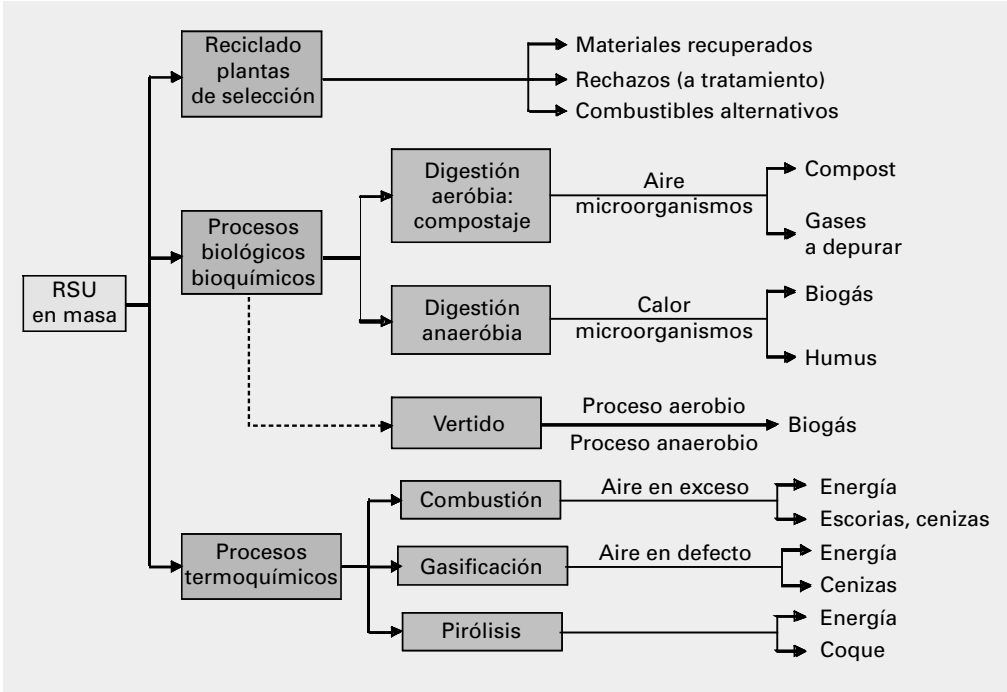


Figura 11.27. Posibilidades de tratamiento y valorización de los RSU.

Como indica la Figura 11.28, los procesos de conversión energéticos (o térmicos) se pueden clasificar en:

- Procesos a alta temperatura, o termoquímicos: combustión (incineración), gasificación y pirólisis.
- Procesos a baja temperatura, o bioquímicos: fermentaciones, digestiones anaerobias, metanizaciones y compostajes.

Debido a todo lo explicado anteriormente se comprende que la elección de un sistema de tratamiento u otro no es arbitraria. En primer lugar, es imprescindible conocer con exactitud la naturaleza del RSU a tratar y después establecer el nivel de pretratamiento al que debe someterse para realizar un determinado proceso de valorización.

Así, mientras el vertido o la incineración no precisan de ninguna etapa de pretratamiento, la metanización o el compostaje, si precisan de un tratamiento previo. En la práctica, y como se verá más adelante esto no es exactamente así: las autoridades ambientales de la UE imponen cada día mayores restricciones al vertido en masa, sin antes realizar un determinado nivel de pretratamiento. En el caso de la incineración también es lógico llevar a cabo una determinada preselección para evitar introducir en el horno impropios dañinos, el vidrio o inadecuados como los metales.

Exceptuando el vertido y la incineración, todas los demás variantes de sistemas de tratamiento o valorización precisan, en mayor o menor grado de un cierto pretratamiento (Esta es la razón por la cual en muchos países de denomina tratamiento al vertido y la incineración, mientras que a los demás sistemas se los identifica con la valorización). Llevando al extremo este razonamiento, se llega a la conclusión de que una vez realizada la recogida selectiva, todos los demás tratamientos descritos, quizás con la excepción de un compost de calidad, deberían estar destinados al tratamiento de los rechazos.

No obstante, también dentro de la fracción rechazo, la elección de un sistema de valorización determinado tampoco es arbitraria. Imagínese una localidad donde solo se recoge selectivamente el vidrio y el papel. Las fracciones mayoritarias del rechazo (o RSU disponible) serán la fracción fermentable, los plásticos, los metales y los textiles. En este caso las opciones bioquímicas (compostaje y digestión anaerobia) deben descartarse. Lo recomendable sería llevar a cabo una preselección para recuperar los metales y con el resto confeccionar unos pelets y gasificarlo, o bien incinerarlo.

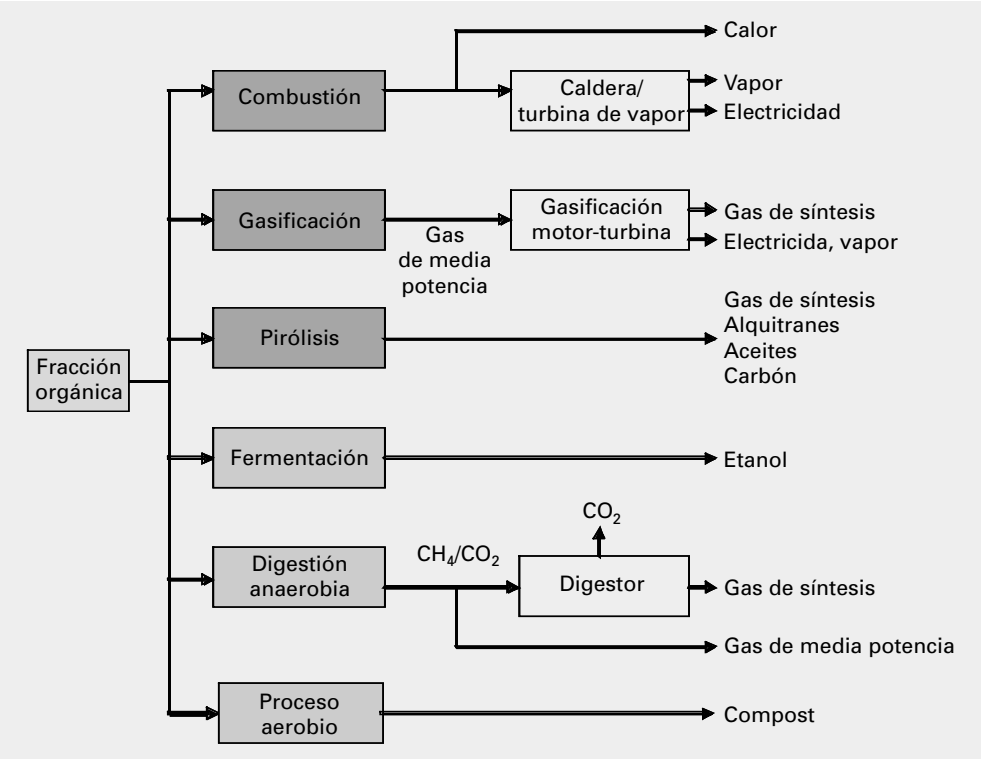


Figura 11.28. Sistemas de conversión en energía.

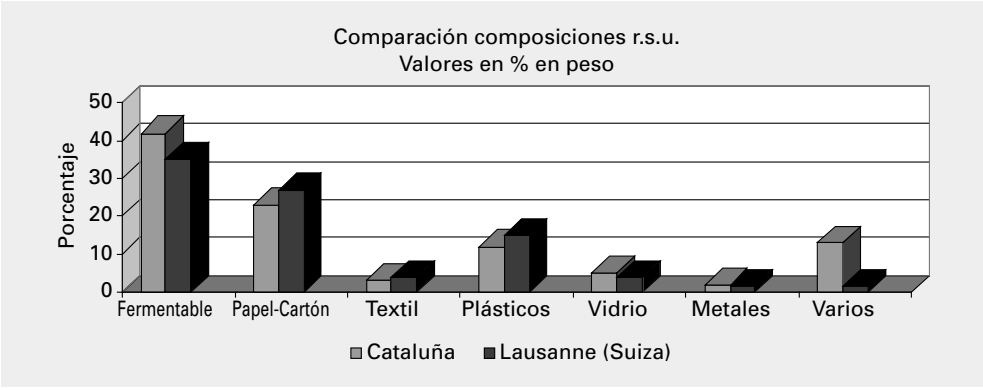


Figura 11.29. Comparación de las composiciones de los RSU entre Cataluña y Suiza.

5.1. EL RSU COMO COMBUSTIBLE

Los RSU se pueden analizar desde muchos ángulos diferentes. Las propiedades físicas vienen determinadas por el peso específico, el contenido de agua, el tamaño de las partículas, la distribución de tamaño o la densidad aparente de compactación. Las propiedades químicas se dan a través del análisis físico, porcentaje en peso de cenizas y su punto de fusión, el análisis elemental y los contaminantes.

Desde el punto de vista energético interesa remarcar los tres componentes principales:

- Materia orgánica fermentable.
- Inertes y cenizas.
- Combustibles.

La Figura 11.29 reproduce, en datos de 1997, los valores de las diferentes partidas que integran los RSU. El apartado de inertes y cenizas corresponde al de metales, vidrios y varios en la citada figura. La propia gráfica indica las diferencias entre una sociedad con un nivel de renta per capita disponible alto (Suiza) y otra medio/alto como Cataluña. Desde la óptica de la caracterización del RSU el resumen es: a mayor PIB mas fracción combustible y con un poder calorífico mas elevado.

La materia combustible (RDF) se compone de papel y cartón, textil y plásticos. Hay que hacer constar que aunque se trate de materia orgánica no suele ser degradable, al menos en los vertederos convencionales. Por esta razón conviene distinguirlos de la materia fermentable, a la cual con frecuencia se le asigna simplemente el nombre de orgánica.

A partir del análisis elemental de los diversos compuestos se puede aplicar la formula de Dulong modificada para hallar el PCI de las diversas fracciones.

$$8.060 \cdot C + 33.910 \cdot (H\text{-}O/8) + 2.222 \cdot S + 556 \cdot N$$

La Figura 11.30 muestra el PCI de los principales componentes del RSU. Es preciso recordar que el PCI siempre está referido a la fracción seca, es decir sin humedad, de ahí la introducción del concepto de PCI útil, donde al PCI (base seca) hay que descontarle el calor de vaporización del agua de humedad.

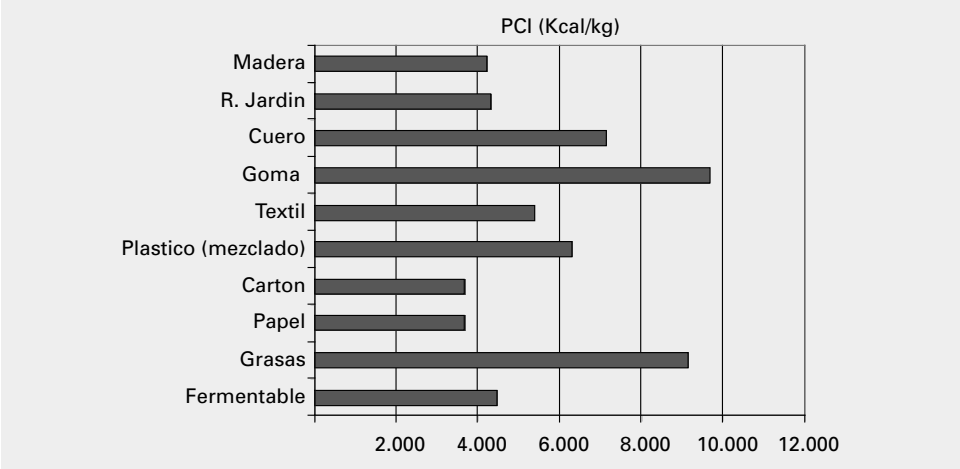


Figura 11.30. PCI de los principales componentes del RSU (base seca).

Tabla 11.49. Poderes caloríficos inferiores de los componentes del RSU

Fermentable	kcal/kg	RDF	kcal/kg	RDF	kcal/kg
Residuo verduras*	1.800	Goma sintética	6.400	Papel decoración	4.150
		Neumático coche	8.650	P. periódicos	4.430
		Skai	5.600	P. embalaje	4.030
		Celofán	3.250	Revistas	2.820
		Plásticos (menos PVC)	9.000	P. plastificado	4.080
		Madera dura	4.400	P. parafinado	6.280
		Contrachapado	4.300	Cartón ondulado	3.900
		Lana	4.600	Acetatos	4.520
		Trapos y algodón	3.600	Zapatos de cuero	4.020

(*) Se supone que este residuo tiene un 45% de orgánico de PCI 4.000 kcal/kg, luego 0,45 · 4.000 = 1.800 kcal/kg. Los demás se suponen secos.

En la Tabla 11.49 aparecen los poderes caloríficos inferiores de los componentes más habituales presentes en los RSU, clasificados de acuerdo con sus grupos lógicos.

Hay que hacer mención, una vez más, que esta tabla proporciona simplemente valores indicativos del PCI de cada uno de las principales fracciones que componen los RSU. Para conocer el PCI exacto debe hacerse una prueba calorimétrica o, conociendo el análisis elemental, aplicar la fórmula de Dulong. Sin embargo, las cifras expuestas en la Tabla 11.49, proporcionan un valor del PCI muy aproximado. En esta tabla no figuran, obviamente, los inertes por cuanto no aportan nada desde el punto de vista energético.

En la Tabla 11.50 se reproduce un ejemplo de cálculo del poder calorífico de un RSU típico.

Los diversos poderes caloríficos (PCI) serán:

- Poder calorífico del RSU 2.321 kcal/kg
- Poder calorífico del RDF (2.069 /0,45) 4.597 kcal/kg

De la Tabla 11.50 se desprende que la humedad media del residuo es del 32,15%. Para evitar confusiones y teniendo en cuenta que el PCI (poder calorífico inferior) de un combustible siempre está referido a la fracción seca, al PCI antes calculado se deberá restar el calor latente de vaporización del agua presente (31,55%). Así pues el calor útil disponible será:

RSU: $2.321\text{-}0{,}3215 \cdot 600 = 2.128$ Kcal/kg

RDF: $4.597\text{-}0{,}0615 \cdot 600 = 4.560$ Kcal/kg

Tabla 11.50. Fórmula de cálculo del PCI de un RSU

Componente	% en peso húmedo	% humedad	Valor en seco	PCI kcal/kg	Total kcal
Fermentable	40	65	14	1.800	252
Parcial Ferm.	**40**	**26,00**	**14,00**	**—**	**252**
Papel	20	15	17	4.200	714
Cartón	10	10	9	3.900	351
Plásticos	11	10	9,9	9.000	891
Textiles	3	30	2,1	3.600	75,6
Madera	1	15	0,85	4.400	37,4
Parcial RDF	**45**	**6,15**	**38,85**	**—**	**2.069**
Vidrio	9	—	9	—	—
Metales	4	—	4	—	—
Otros	2	—	2	—	—
Parcial Iner.	**15**	**—**	**15**	—	—
Total	100	32,15	67,85	—	2.321

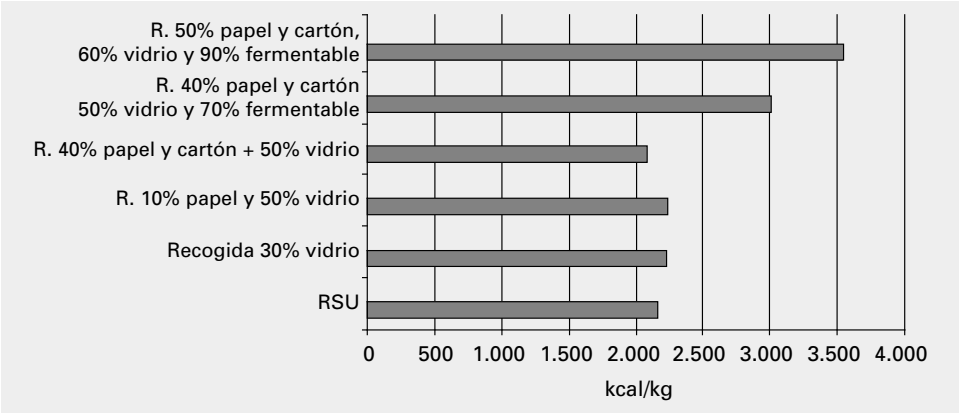


Figura 11.31. Poder calorífico de residuos domiciliarios según la recogida selectiva.

Siendo estos valores los que deberán figurar en los balances térmicos. Parte de la energía del combustible debe usarse para evaporar el agua de humedad. En un proceso térmico de valorización los gases de escape, a la salida de la caldera de recuperación, son lanzados a la atmósfera a una temperatura, por lo general, alrededor de los 150 °C. Esto significa que el calor de vaporización del agua no se recupera, de ahí el concepto de PCI útil.

5.1.1. La variación del poder calorífico de los RSU con la recogida selectiva

Con referencia al poder calorífico de los RSU ni la fracción fermentable ni la inerte aporta energía a efectos prácticos, por tanto lo más adecuado, de cara a la valorización energética, es segregarlos del todo. Ello se logra a base de la recogida selectiva. No obstante esta puede llevarse a cabo en diferentes versiones. La Figura 11.31 muestra la evolución del poder calorífico de los residuos domiciliarios según la cantidad y calidad de la recogida selectiva.

Del ejemplo se deduce que el poder calorífico no varía significativamente en ninguno de los escenarios anteriores a excepción del caso de la recogida selectiva de la fracción fermentable. Ello es obvio por cuanto esta fracción es la que contiene mayor cantidad de agua. Además su eliminación, aunque sea parcial, reduce el peso de manera importante y el valor unitario energético (kcal/kg) aumenta. Prosiguiendo la recogida selectiva se obtendría el RDF, cuyo poder calorífico superaría las 5.000 kcal/kg.

También debe valorarse el hecho de que al eliminar parte de la fracción inerte se reducirá, en idéntica cuantía, la cantidad de escorias en la incineradora y disminuirá la densidad del residuo.

Al margen de la eficacia de la recogida selectiva, en la Tabla 11.51 sólo se citan aquellos componentes del RSU que tienen aplicaciones energéticas.

Tabla 11.51. Caracterización de los componentes de los RSU

Componente (%)	C	H	O	N	S	Humedad	Ceniza	PCI(*) kcal/kg
Periódicos	46,40	5,74	40,46	0,05	0,15	5,97	1,42	4.430
Cartón corrugado	41,46	5,40	42,59	0,09	0,20	5,20	5,06	3.913
R. vegetales	10,65	1,44	8,15	0,36	0,04	78,29	1,07	997
R. cárnicos	36,50	5,80	15,10	0,06	0,12	38,7	3,68	4.235
Zapatos cuero	38,88	4,92	21,13	5,53	0,09	7,5	21,9	4.024
Plantas jardín	21,49	3,04	18,51	0,56	0,12	53,9	2,34	2.054
Hojas secas	46,95	5,50	27,32	6,29	0,14	9,9	3,83	4.436
Neumáticos	78,18	6,77	5,86	0,12	1,50	1,0	6,55	7.726
Muebles	46,64	5,70	40,11	0,14	0,07	6,0	1,34	4.341
Polietileno								10.100
Poliestireno								10.100
Algodón								3.600

(*) Sobre base húmeda.

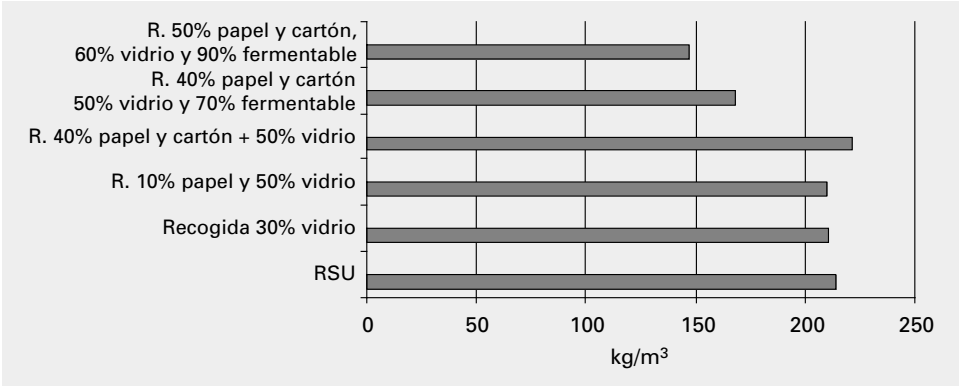


Figura 11.32. Densidad aparente del RSU según el modelo de recogida.

A partir de la Tabla 11.51 será fácil calcular la potencia calorífica de un residuo doméstico determinado una vez conocida su composición.

5.1.2. Caracterización del RDF

En la UE no existe una definición oficial del RDF por esto en cada país tiene una caracterización determinada. Incluso en muchos de ellos los materiales procedentes de los RSU se mezclan con otros residuos de origen industrial. La relación siguiente incluye una breve descripción de una serie de residuos que se pueden mezclar con los RDF antes de proceder al peletizado y ello da una idea de la gran variedad:

- Disolventes usados. En los hornos de clínquer es preceptivo mezclarlo con aserrín antes de introducirlo en el horno. En los Países Bajos también se usa en las plantas termoeléctricas.
- Aceites minerales usados. De la cifra aproximada de 2,5 millones de toneladas en toda la UE un 30% se trata a base de separar el agua y sedimentar los sólidos y fangos y se emplea como combustible en los hornos de clínquer. En algunos países esta permitido usar, en estos hornos, el aceite sin tratar.
- Plásticos desclasificados (o sea aquellos plásticos residuales sobrantes o sin salida comercial originados de las plantas de selección procedentes de la recogida selectiva). En Alemania se emplean como agente reductor en los altos hornos es sustitución del coque. Los procedentes de la trituración de los automóviles (ASR: «*Automotive Sherreder Residue*») se usan en las termoeléctricas en Dinamarca y en los hornos de clínquer en Bélgica.
- Restos de papel, de plantas de selección, y fangos de papelera son quemados en hornos de clínquer en Austria, Alemania o los Países Bajos.
- Residuos de animales, incluidas las harinas cárnicas, también se emplean como combustible en los hornos de clínquer.
- Toda clase de residuos lignocelulósicos.
- Alfombras y moquetas viejas se coincineran en los hornos de clínquer.

Los países de la UE que más coincineran residuos son Francia y Alemania, seguidos de Austria y Bélgica. En el caso de los RDF fabricados a partir del RSU, en el año 1997, se incineraron como combustible alternativo 120.000 toneladas, lo que supone, aproximadamente, un 6% del total de los combustibles alternativos empleados en la UE.

5.1.3. Especificaciones de los RDF

Con las acotaciones hechas anteriormente, para saber exactamente la naturaleza de los contaminantes hay que conocer la composición del RDF. Si esto no se conoce, la relación siguiente da una idea bastante aproximada de los más usados:

- Poder calorífico: de 13 a 16 MJ/kg (3.110 a 3.820 kcal/kg).
- Escorias: del 5 al 15%.
- Cloro: del 0,5 al 0,9%.
- Azufre: del 0,0 al 0,2%.
- Humedad: del 10 al 35%.

5.2. LA ESENCIA DE LA DESTRUCCIÓN TÉRMICA

La presencia de contaminantes peligrosos en los RSU confiere a la incineración un nuevo rol que vale la pena explorar. Cualquier proceso de conversión

energética estriba en la transformación de la materia orgánica (combustible) en gases portadores del calor. Para ello es obvio que la materia orgánica, en última instancia, ha de desaparecer para convertirse en H_2O y CO_2.

Una caldera de vapor está concebida para transferir el calor sensible de los gases de combustión a los tubos donde el agua es vaporizada y, habitualmente, el vapor sobrecalentado. Con independencia del tipo de combustible usado, el objetivo del proceso es:

- Lograr que no se produzcan inquemados. Desde el punto de vista energético los inquemados son compuestos orgánicos que de no ser oxidados se emitirán a la atmósfera perdiendo así una parte del calor del combustible.
- Conseguir que la temperatura de los gases a la salida de la caldera sea mínima, de manera que el calor sensible de los gases en la chimenea sea mínimo.

Volviendo a los inquemados es fácil demostrar que su presencia tiene una doble implicación: energética, como se ha comentado, y ambiental, que se hallan estrechamente relacionadas. Quizás la diferencia más destacable es que cuando se analiza desde la óptica energética el problema (económico) es tan agudo que se intenta poner remedio de inmediato. Sin embargo la vertiente ambiental (emisión de contaminantes a la atmósfera) no es tan evidente, es muy difícil de detectar y tiene poca incidencia desde el punto de vista energético.

Los llamados inquemados tienen dos orígenes:

- Las deficiencias en los sistemas de oxidación. Ya sea el CO presente en los gases de combustión de un horno de parrillas o de un quemador de gas natural (con independencia del exceso de aire empleado) o el arrastre de material producido en las parrillas o en el hogar de una caldera.
- Los hidrocarburos generados en la propia cámara de combustión. Estos últimos son menos conocidos pero muy frecuentes en todos los procesos de conversión energética cuando se tratan combustibles sólidos o líquidos.

En todos los casos, si los inquemados son gases o vapores, la manera de solucionarlo es la instalación de una cámara de postcombustión donde se asegure un tiempo de residencia mínimo de los gases combustibles presentes que permita la degradación de los enlaces moleculares. La cámara de postcombustión es parte obligada de las incineradoras.

Como se desprende del apartado anterior, existe un binomio eficiencia energética-«eficacia ambiental» (que más adelante se definirá como eficiencia de la destrucción térmica de los contaminantes), que hace falta aclarar. La manera más universal y fácil, pero no la única, de medir la eficiencia de la combustión es a través de la presencia del monóxido de carbono (CO).

En los procesos industriales es difícil conseguir una combustión completa, o sin la presencia de inquemados. Durante el proceso de combustión se presentan oscilaciones de la temperatura que es preciso corregir de manera constante. Esta corrección suele llevarse a cabo por medio de la cantidad de aire. Cuando la masa de comburente varía, la hidrodinámica de la mezcla se altera y las probabilidades de que aparezcan inquemados, aunque sea de forma instantánea, es muy grande. De hecho esta contingencia ya la prevén los diagramas de combustión, donde la posibilidad de tener inquemados es muy elevada.

El primer inquemado, y más común, que aparece es el monóxido de carbono (CO). Se trata de un gas venenoso, cuya ecuación de formación:

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow 2\ H_2O + CO_2 + CO\ (\text{trazas})$$

indica, suponiendo que la mezcla sea correcta, que:

- Cuanto más carbono esté presente en el combustible, mayor potencial de formación de CO.
- La producción de CO disminuye con el incremento del exceso de aire.
- La producción de CO aumenta con el incremento de la temperatura.

Se define la eficacia de la combustión (CE) como el resultado del cociente:

$$CE = 100 \cdot \frac{CO_2}{CO_2 + CO}$$

Si bien desde el punto de vista técnico (energético) una CE = 99,5% parece un buen resultado, transponiendo este valor a la ecuación anterior, para un valor del 10% del CO_2, resulta CO = 0,0503%, o sea 502,5 ppm de CO, o bien 628 mg CO/m^3, valor inaceptable desde la óptica medioambiental.

A titulo de ejemplo y para dar mayor énfasis a estos comentarios, el RD 653/2003 (transposición de la Directiva 2000/76/CE relativa a la incineración de residuos) fija un valor de 100 mg CO/Nm^3 de gases de escape, lo que equivale a 87,1 ppm valor que, si-

guiendo con un porcentaje del 10% de CO_2 obliga a trabajar con una eficiencia de la combustión del 99,92%.

5.3. ASPECTOS AMBIENTALES DE LA INCINERACIÓN DE RSU

El combustible (RSU) se combina con el aire, libera energía y genera, básicamente, dos tipos de residuos:

- Los sólidos (cenizas y escorias).
- Los gaseosos (o contenidos en los gases).

Estos últimos son los responsables de las emisiones y, si éstas superan los estándares establecidos por la legislación vigente, es preciso instalar los equipos de lavado y filtraje.

Las dioxinas y los furanos son compuestos tóxicos formados por anillos bencénicos en cuyos radicales se insertan oxígenos y cloros, lo que da lugar a un sinfín de isómeros alguno de los cuales son extremadamente tóxicos.

Existe una formación natural de dioxinas en el cieno y en el compost. Los incendios naturales generan, al igual que numerosos procesos industriales, muchas más dioxinas que las incineradoras. Son compuestos térmicamente estables hasta una temperatura aproximada de 600 °C, son liposolubles y muy poco solubles en agua. Es debido a ello que son muy estables y de ahí su persistencia en el medio (se han encontrado dioxinas en muestras históricas).

Un nivel térmico que asegure una temperatura de 800 °C durante un tiempo de residencia mínimo de dos segundos garantiza la destrucción de estos compuestos organoclorados.

El inventario de dioxinas y furanos llevado a cabo por el CSIC (Consejo Superior de Investigaciones Científicas) y el CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas) en 2004, indica que en los tres últimos años las emisiones de dioxinas y furanos generadas por el conjunto de las incineradoras españolas (8 operativas) ha pasado de 20 gramos a 1,2 gramos al año y figuran entre las más eficientes del mundo. A título de ejemplo, el inventario de dioxinas y furanos de origen antropogénico, llevado a cabo en el año 2000 en Alemania, pone de manifiesto que la incineración de RSU contribuye escasamente con el 3% al total de dioxinas y furanos generados en el país.

La presencia de RPU en los RSU tiene otras implicaciones durante la incineración. La fracción inorgánica de los RDP, por ejemplo los metales contenidos en las pilas, tenderá a integrarse en las cenizas volantes. Éstas como es sabido, ya están consideradas como RTP y reciben un tratamiento específico antes de su depósito en vertederos especiales. En términos de protección del medio ambiente, este tratamiento es infinitamente más seguro que si la pila terminase directamente en el vertedero.

5.4. EL TIEMPO DE RESIDENCIA Y LA TEMPERATURA

El tiempo de residencia hace mención al tiempo que los gases han de permanecer a alta temperatura. Sin embargo, y en relación a la naturaleza orgánica de los compuestos presentes en los RPU o bien los contaminantes generados por el propio horno, vale la pena hacerse dos preguntas:

¿Cuál es el tiempo de residencia correcto? En primer lugar debe aclararse que la destrucción térmica es un término que se aplica a un compuesto químico específico, no a un residuo. Por tanto, para responder a esta pregunta hay que saber de que compuesto se habla. Por lo general el explotador de una planta de incineración sabe cuál es la naturaleza del combustible a tratar, o bien cual es el peor compuesto que contiene el combustible a quemar. En el supuesto de que pudiera responder a esta pregunta, la siguiente es más complicada ¿Cuál, o cuáles, son los hidrocarburos formados en el horno?. Ante tales interrogantes el legislador opta por tomar un tiempo de residencia, los famosos dos segundos, donde por experiencia se sabe que la inmensa mayoría de los compuestos químicos se destruyen en más del 99,99%.

¿Cuál es la temperatura correcta? Esta pregunta esta íntimamente relacionada con la anterior, ya que depende de la naturaleza del compuesto químico. Además ambos parámetros: tiempo y temperatura, están relacionados de manera que es factible construir la denominada curva de destrucción térmica de un compuesto químico, con una eficacia del 99,99%. Es decir, se logra el mismo resultado (la destrucción térmica) con más tiempo y menos temperatura que con menor tiempo de residencia y mayor temperatura. Así, ante este dilema, el RD 563/2003 con buen criterio se decanta hacia la siguiente solución: «Fija el tiempo de residencia de los gases, que tiene que ver con el diseño de la instalación y obliga a una temperatura mínima en la cámara de postcombustión». De esta manera en el

caso de que se detecte una ineficiencia en la destrucción térmica, se puede fácilmente elevar la temperatura. Para los RSU, el citado RD, fija una temperatura de trabajo de 850 °C, con un tiempo de residencia de los gases, a esta temperatura, de dos segundos. Estos parámetros son más que suficientes para garantizar la destrucción térmica de la inmensa mayoría de los compuestos orgánicos contaminantes que pudieran contener los RSU.

5.5. EL TRATAMIENTO DE LOS GASES

Uno de los problemas inherentes a las combustiones, y por tanto también de la incineración, es la formación de hidrocarburos de muchos tipos, por ejemplo:

- Hidrocarburos heterocíclicos (piridinas, furanos, indoles, etc.).
- Hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH), muchos de ellos catalogados de cancerígenos como: Benzo(a)pireno, 2-Naftilamina, 4-Aminobifenil, Nitrosamina, Benceno, Hidracina, 2-Toluidina, etc.

Para garantizar la inocuidad de los gases a la salida, el citado RD 653/2003 fija unos valores de emisión de contaminantes a la atmósfera que son bien conocidos y parte de la base de que junto a los residuos van a estar presentes una serie de contaminantes «no previstos», como sería el caso de los RPU, que obliga a instalar una completa línea de tratamiento de gases que, en síntesis, se puede concretar en:

- Neutralización de gases ácidos, con lo que se eliminan las emisiones de compuestos de esta naturaleza (básicamente debido al Cl y al S).
- Adición de carbón activo, para adsorber los compuestos orgánicos residuales y, sobre todo, los metales pesados.
- Filtro de mangas para recoger todo el material particulado, incluyendo las sales resultantes del proceso de neutralización y el propio carbón activo.

El residuo sólido resultante del tratamiento de gases son las cenizas volantes.

El RD 653/2003, derivado de la Directiva europea, ha reducido drásticamente las emisiones de todo tipo, en particular las gaseosas. En el caso de Alemania, la emisión de Pb del 1990 a 2001 se redujo de 57.900 a 130,5 kg (es decir sólo el 0,2% de las emisiones iniciales), en el caso del Hg las cifras van de 347 a 4,5 kg (solo el 1,3%) y para el material particulado la reducción ha sido de 25.000 toneladas a menos de 3.000. Para las dioxinas y furanos en el año 1994 se emitieron, solo en las incineradoras de RSU 400 gramos, en el 2000 32 gramos y en 2003 0,5 gramos, que en éste año representaron el 0,7% de todas las dioxinas y furanos emitidas por el país.

En el DVD adjunto, en el punto 8, se muestra una extensa información sobre diversos sistemas de tratamiento y lavado de gases procedentes de incineración.

5.6. LA INCINERACIÓN DE LOS RSU

En España hay, actualmente, en activo ocho instalaciones de valorización o aprovechamiento energético de RSU, cuyas características se hallan reflejadas en la Tabla 11.52.

Tabla 11.52. Instalaciones de valorización energética de RSU en España

Nombre	Año puesta marcha	Comunidad	Producción t/año	Producción Eléctrica MW
Montcada i Reixac (*)	1982	Cataluña	43.000	0,8
Sant Adriá	1986	Cataluña	270.000	18,0
Girona	1992	Cataluña	50.000	1,9
Tarragona	1992	Cataluña	125.000	7,5
Mataró	1994	Cataluña	180.000	11,1
Madrid	1995	Madrid	400.000	29,0
Palma Mallorca	1996	Baleares	285.000	22,7
Melilla	1998	Melilla	30.000	2,7

(*) Clausurada en 2005.

La tabla anterior supone una cantidad de residuo incinerado de, aproximadamente, 20 kg RSU/habitante y año, cuando en Dinamarca supera los 600, Suiza 410, Países Bajos y Suecia 300 o Alemania 160. Es decir, la cantidad tratada por esta vía en España es mínima. En resumen, el escenario de incineración de RSU en otros países de la UE es bien diferente al español, esencialmente por los siguientes motivos:

- En la inmensa mayor parte de los países de la UE, el aprovechamiento energético de los residuos y biomasa residual tienen una larga tradición y se emplea en todos los ámbitos posibles de aplicación.

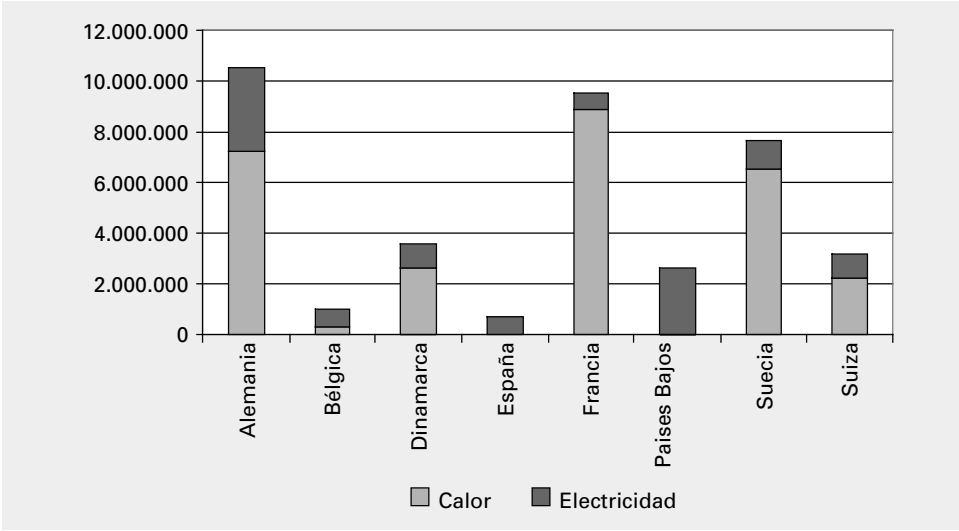


Figura 11.33. Producción de energía procedente de residuos, en MW, en países de la UE.

- También en la mayoría de los países se lleva a cabo una real cogeneración, es decir se produce de manera simultánea electricidad y calor, siendo esta última mucho más importante. La Figura 11.33 certifica, según datos de la Comisión Europea de 2004, lo comentado.

La Figura 11.33 muestra como en la mayoría de los países citados con el RSU se produce calor (normalmente «*district heating*») en lugar de electricidad. Hay que tener presente dos factores:

- En muchos de estos países se procura solucionar el problema energético en los mismos pequeños centros de generación y ello conduce a que sea más rentable el uso térmico. (Una instalación de este tipo, de pequeño tamaño, para la generación de electricidad es casi prohibitiva en términos económicos).
- El clima frío de estos países facilita el uso térmico, muchos meses al año.

La conversión térmica de los RSU suele tener un rendimiento del 85%, mientras que la conversión en energía eléctrica difícilmente supera el 21%. En tales circunstancias se explica que en lugares de clima frío se procure el uso del calor, mientras en otras latitudes de clima más benigno, como España, se opte por la generación eléctrica.

La Directiva 2000/76/CE relativa a la incineración de residuos aunó la normativa dispersa que regía en la UE en referencia a instalaciones de incineración de RSU y residuos peligrosos, anteriormente tratadas de manera diferenciada, convirtiendo en comunes los valores máximos de emisiones permitidos independientemente del tipo de residuo que trataran. Uno de los objetivos principales de esta directiva es cumplir con los compromisos internacionales adquiridos por la Unión Europea en materia de reducción de la contaminación, en particular los relativos al establecimiento de valores límite para las emisiones de dioxinas, mercurio y polvo ocasionadas por la incineración de residuos. Algunos de los principales aspectos técnicos de la Directiva son:

- Temperatura mínima de mantenimiento de los gases de combustión de 850 °C durante un mínimo de dos segundos en la cámara de postcombustión para asegurar la correcta destrucción de compuestos orgánicos.
- Obligatoriedad de aprovechar el calor residual del proceso.
- Establecimiento de valores límite de las emisiones atmosféricas de metales pesados, dioxinas, furanos, monóxido de carbono, cenizas, carbono orgánico total, cloruro de hidrógeno, fluoruro de hidrógeno, dióxido de azufre, monóxido de nitrógeno y dióxido de nitrógeno, estableciendo controles en continuo para todos los parámetros excepto metales y dioxinas.
- Obligatoriedad de gestionar correctamente los residuos de estas instalaciones, escorias, cenizas y residuos del lavado de gases.

5.6.1. El proceso de combustión

La combustión es una reacción química de oxidación entre moléculas de bajo peso molecular con potencial de oxidación y oxígeno, con desprendimiento

de calor. En el caso de la incineración se entiende concretamente la combustión de compuestos orgánicos (combustibles) en presencia de aire, es decir, un elemento comburente o con potencial de oxidación como es el oxígeno.

De esta manera se comprende que la combustión sea una reacción química que difícilmente se puede dar entre sólidos y líquidos, ya que las moléculas no tienen la posibilidad de combinarse con el comburente sencillamente por falta de contacto.

La combustión en cualquier horno de incineración se da entre los gases (hidrocarburos y otros vapores y gases combustibles) que se desprenden del combustible, sólido o líquido, debido a su descomposición y degradación térmica y al oxígeno contenido en el aire. Por lo tanto la incineración de cualquier material tendrá una primera fase de absorción o consumo de energía para descomponer o gasificar y será la combustión de los gases resultantes la reacción (exotérmica) que liberará la energía que se utiliza. Es el concepto de la llamada energía de activación.

En el DVD adjunto, en el punto 9, se muestra información sobre diversas incineradoras de RSU, así como un video acerca del funcionamiento de la incineradora de Mataró (Barcelona).

5.6.2. Caracterización de los residuos combustibles

Para que un material sea combustible debe reunir una serie de propiedades y que, además sea rentable incinerarlo en las instalaciones convencionales de incineración. Estas características son:

- Composición elemental: la composición elemental de un combustible debe ser C_nH_{n+x} es decir, compuestos orgánicos. Los materiales inorgánicos que entran en el horno junto al resto de residuos, como metales, escombros, etc. Absorben energía y bajan el rendimiento del horno. Es importante que el contenido de materiales inorgánicos sea mínimo.
- PCI. Poder calorífico inferior: para que las reacciones dentro del horno se puedan dar es necesario que la energía consumida en la gasificación del material sea inferior a la energía liberada por la combustión de los gases. Esta energía debe ser suficiente para gasificar la materia y calentar los elementos inertes del horno, como la fracción no combustible, el agua y la parte del aire no reactivo (77% de nitrógeno). El poder calorífico inferior expresa la cantidad de energía que es capaz de liberar un combustible al oxidarse, estando inicialmente seco y considerando perdida la energía de la condensación del vapor de agua que se libera en toda reacción de combustión. Indica, por tanto, su viabilidad en términos de combustible.
- Humedad: el grado de humedad del residuo condiciona el proceso de combustión. El agua del residuo consume una cantidad de energía para evaporarse y para elevar la temperatura del vapor, bajando la temperatura del horno y dificultando su correcto funcionamiento. También condiciona la textura de los residuos, dificultando la combustión la forma pastosa ya que no favorece el contacto combustible-comburente.
- Presentación física del residuo: dado que la materia debe descomponerse térmicamente, la superficie específica debe ser máxima. Para eso, los residuos deben estar el máximo de triturados posible y de una medida tan homogénea como sea posible.

5.6.3. Tipos de hornos para RSU

Por lo general se emplean tres tipos de hornos para la incineración de los RSU:

- Hornos de parrillas.
- Hornos de lecho fluidizado.
- Hornos rotatorios.

La Figura 11.34 muestra un esquema de una planta completa de incineración equipada con horno de parrillas.

Dejando de un lado la evolución de la caracterización de los RSU en las sociedades industrializadas de los últimos años ha ido aumentado el PCI de año en año. La eficacia de los sistemas de incineración desde el punto de vista estrictamente energético pivotan sobre tres factores:

- Los sistemas de alimentación de los RSU y su clasificación.
- Las formas de las parrillas y revestimientos de los hornos.
- Las calderas.

La tasa de rendimiento de transformación de los RSU en electricidad es baja del orden de 17% y supera escasamente el 20% en grandes instalaciones.

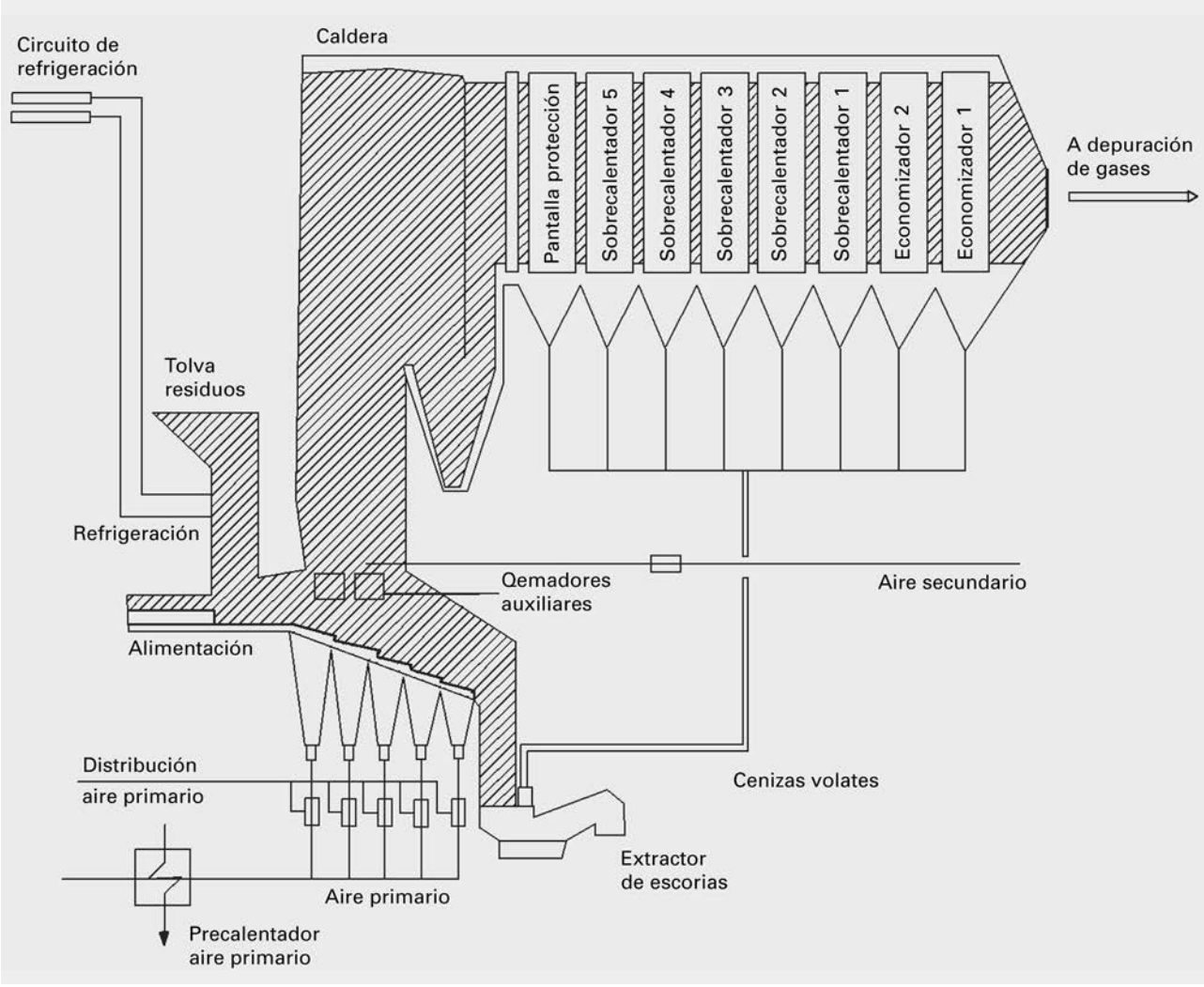


Figura 11.34. Instalación completa de incineración de RSU.

En la destrucción de los RSU (con o sin pretratamiento) mediante la combustión, el aprovechamiento del calor producido en forma de vapor de agua es un factor clave en la economía del proceso. Permite recuperar igualmente la fracción metálica de las escorias, que, por otra parte, pueden tener aplicación en obras públicas.

Hornos de parrillas: son el tipo utilizado tradicionalmente para los RSU. Pueden ser parrillas fijas o móviles o bien de rodillos, con el mismo concepto de funcionamiento. Las parrillas o rodillos son elementos móviles que hacen avanzar los residuos a lo largo del horno para favorecer su descomposición, inyectando aire desde abajo para enfriar las parrillas (impidiendo que se deformen por exceso de calor) y evitar la fusión de las escorias. La Figura 11.35 muestra el interior de un horno de parrillas.

En el DVD adjunto, en el punto 10, se muestran diversas fotos y esquemas de parrillas para hornos de RSU.

Hornos de lecho fluidizado: la principal característica es que el lecho está compuesto de material refractario, en constante movimiento mediante un caudal de fluidificación, en su interior existe un árido actuando de lecho para acoger a los residuos a tratar, que deben ser triturados de manera apropiada. Entre sus ventajas figura el poder añadir reactivos al propio lecho que neutralizan los gases sulfurados antes de pasar a la cámara de oxidación. Asimismo, su configuración permite trabajar a menor temperatura y con un exceso de aire más ajustado, minimizando los niveles de formación de óxidos de nitrógeno y redu-

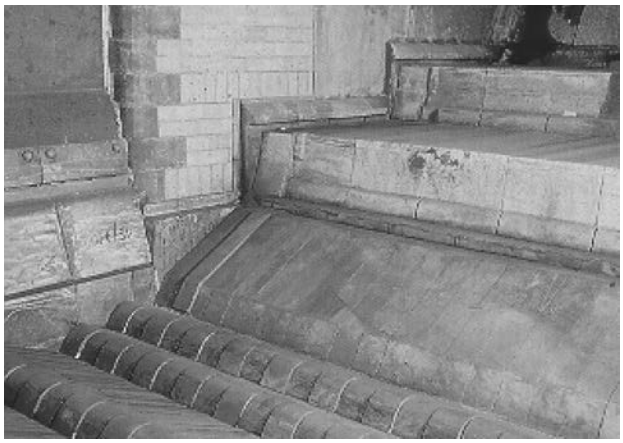


Figura 11.35. Horno de parrillas.

ciendo el tiempo de residencia. La Figura 11.36 muestra el esquema de un reactor de lecho fluidizado de este tipo.

En el DVD adjunto, en el punto 11, se muestra diversa información sobre hornos de lecho fluidizado.

Hornos rotatorios: es la modalidad de horno que suele usarse para la incineración de residuos industriales, cárnicos o bien cuando se trata de incinerar

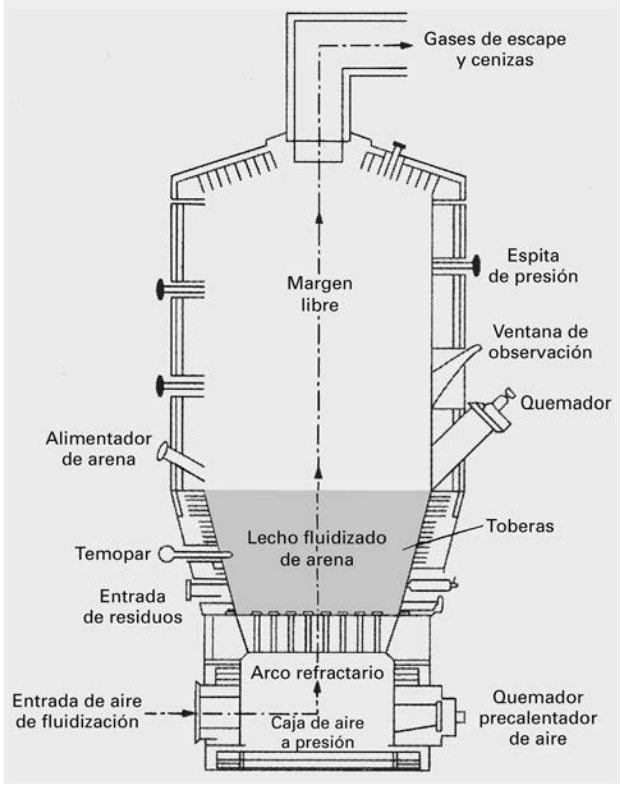


Figura 11.36. Horno de lecho fluidizado.

mezclas de residuos con PCI no bien definidos. Esencialmente consta de un cilindro con revestimiento de material cerámico en su interior, que va girando a una velocidad variable e instalado con una inclinación que permite regular el tiempo de residencia de los sólidos.

Las principales características diferenciales son:

- La carga suele ocupar el 20% del volumen.
- Permite variar la inclinación y velocidad y con ello el tiempo de permanencia de los sólidos (por lo general las escorias son de muy buena calidad).
- No hay partes metálicas, lo que equivale a decir que no existe limitación de temperatura de trabajo.
- Puede trabajar con cualquier cantidad de aire. Por lo general en el horno se adiciona el aire estequiométrico y el exceso (aire secundario) se añade en la cámara de oxidación.
- Arrastre de partículas reducido. Ello depende de la relación longitud/diámetro.
- Posibilidad de inyectar aire caliente.
- Tratar cualquier tipo de residuo (sólido, líquido o pastoso).

Como principal inconveniente, para el tratamiento de RSU, es que su capacidad de tratamiento (t/h) es limitada.

En el DVD adjunto, en el punto 12, se muestra diversa información sobre hornos rotatorios.

5.6.4. Sistemas de preparación del RDF

En la mayoría de los RSU la fracción fermentable es el principal componente en términos de cantidad, además el hecho de que tenga entre un 70 y un 80% de humedad condiciona en gran manera la incineración de los residuos. Existen dos sistemas básicos de producción de RDF de alta calidad energética a partir de los RSU:

- Planta mecánica/biológica de tratamiento.
- Planta de estabilización por secado.

Por el primer sistema los metales y los inertes son separados de la fracción orgánica por tamizado. La fracción fermentable es conducida a una planta de producción de compost (compost de muy mala calidad que por lo general termina en el vertedero o incinerándose) o a una instalación de digestión anaeróbia para producir biogás. La fracción combustible

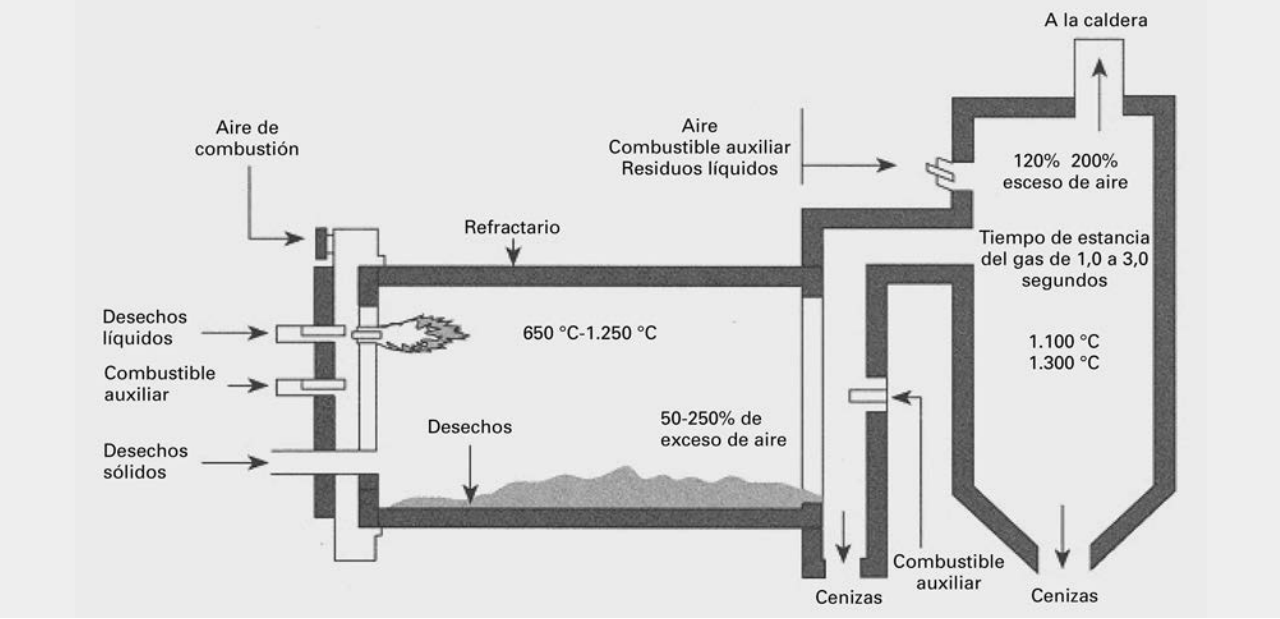


Figura 11.37. Horno rotatorio.

(RDF) es de muy buena calidad, compuesta casi exclusivamente por papel, cartón, plásticos y textiles, lo que proporciona un alto PCI.

El segundo sistema, la planta de secado, se inicia a partir de la fracción resultante una vez separados los metales y los inertes. El resto se somete a un secado con lo que la fracción fermentable se estabiliza (mueren gran cantidad de gérmenes patógenos y otros pierden movilidad al quedarse sin agua). Lo importante es que ahora el residuo puede almacenarse e incinerarse cuando se quiera.

Este último proceso parece más lógico, si bien el secado es una operación cara ya que debe evaporarse gran cantidad de agua, puesto que no se produce un residuo secundario.

En la UE la cantidad de RDF fabricado en el año 2001 era de algo más de 3 millones de toneladas con un horizonte de 15 millones para el 2005.

En el DVD adjunto, en el punto 13, se muestra información sobre sistemas de pretratamiento de RSU y fabricación de RDF.

5.6.5. Sistemas de combustión del RDF

El RDF es un combustible de carácter renovable con un notable PCI, entre 3.500 y 4.500 kcal/kg según su procedencia, por tanto con una energía que alcanza y, a veces supera, a algunos carbones de mala calidad. Por esto en los últimos años han proliferado plantas de fabricación de combustible (RDF) a partir de los RSU o bien de las plantas de selección de los residuos.

Los sistemas habituales de valorización de los RDF son:

- Sistema *«on-site»*. O sea el RDF se produce en una planta de selección que se halla junto a la propia incineradora. En los países escandinavos es muy frecuente la co-incineración de RDF con biomasa, y madera usada, para plantas de «*district heating*» de hasta 20 MW térmicos. En términos de masa la aportación del RDF suele oscilar entre el 10 y el 30% del combustible.
- Sistema *«off-site»*. Se fabrica el RDF, se peletiza y se transporta hasta el lugar de la futura incineración.
- Sistema de coincineración en grandes calderas de centrales térmicas, hornos de clínquer, metalúrgicos, etc.

5.6.6. El rendimiento energético de la incineración

Un análisis del rendimiento energético de la incineración, que sirva de punto de referencia y comparación con otros medios de generación de energía, hay que llevarlo a cabo bajos unos criterios estrictamente técnicos y partir de los siguientes parámetros:

- Se supone que el PCI útil es el mismo para todos los ejemplos (de hecho el parámetro que se

considera fijo es la humedad). Si se estima un poder calorífico útil de 2.000 kcal/kg RSU (equivalente a 2,32 kW/kg), la energía térmica liberada, en términos unitarios, será equivalente al PCI útil.

- Se supone que la caldera de recuperación emite gases a la atmósfera a unos 160 °C, o sea que el rendimiento global del conjunto horno/caldera de recuperación es del orden del 86%. Es decir, en el presente ejemplo, la energía térmica recuperada será de 1.720 kcal/kg (2,00 kW/kg).
- Sí, con el calor recuperado se hace vapor de agua recalentado para expandirlo en una turbina de vapor (ciclo de Rankine), el rendimiento de la transformación depende del grado de recalentamiento del vapor y del tamaño de la planta. Así para plantas de mediano tamaño (superiores a 100.000 tRSU/año) el rendimiento de la transformación térmica/eléctrica, podría ser del 22%-24%. Tomando una media del 23% y regresando al ejemplo de partida, la generación eléctrica sería: $2,0 \cdot 0,23 = 0,46$ kW(eléctricos)/kg RSU. Un factor rápido de conversión global, para este caso, es del 20% ($2,32 \cdot 0,2 = 0,46$). Para instalaciones de menor tamaño el rendimiento global es menor pero, en las de gran tamaño, el rendimiento es del 26%-29%, tomando una media del 27% y utilizando el mismo RSU, el rendimiento global sería: $0,86 \cdot 0,27 = 0,23$. En este caso la producción eléctrica, para el mismo RSU aumentaría: $2,32 \cdot 0,23 = 0,534$ kW(eléctricos)/kg RSU.

En resumen, los ratios de transformación medios y normales en la incineración usando caldera de recuperación y ciclo de Rankine, se pueden establecer en:

- Recuperación de calor: 86%
- Generación de electricidad: 20-23%

En relación a este último valor, que es el que más afecta a países de clima templado como España, donde una planta de «*district heating*» no tendría utilidad más de siete meses al año, es lógico que se genere electricidad a pesar de los rendimientos tan bajos. Por esta razón, en los últimos años se han hechos esfuerzos muy importantes para mejorar estos rendimientos, como el que se expone en el apartado siguiente.

5.6.7. Sistemas avanzados de incineración

Vale la pena citar el caso de optimización del complejo energético de Zabalgarbi (Bilbao, España), planta inaugurada en 2005, donde se incineran 250.000 t/año de RSU, que daría lugar a 12 MW(e) en caso de funcionar el ciclo abierto y turbina de gas natural de 43 MW(e), también en caso de trabajar en ciclo abierto. El avance tecnológico consiste en que ambas funcionan de manera combinada.

La caldera de recuperación de la incineradora produce vapor a 350 °C (bajo punto de recalentamiento pero tiene la ventaja de dar lugar a unos reducidos índices de corrosión). El vapor se envía a una segunda caldera de recuperación donde son conducidos también los efluentes gaseosos de la turbina de gas. En esta segunda caldera de recuperación la temperatura de recalentamiento del vapor se eleva hasta 540 °C (no hay problema de corrosión) y el rendimiento de la turbina de vapor aumenta de gran manera. El resultado global es de 95 MW(e), desglosados de la siguiente manera:

- Potencia atribuida a la incineración de RSU: 12 MW(e) (Tratado como ciclo simple).
- Potencia atribuida al gas natural: 72,5 MW(e), (turbina de gas más la de vapor en la parte correspondiente a los gases de la turbina de gas). El consumo de gas natural es de 125.000 termias PCI/h.
- Incremento de potencia de la turbina de vapor debido al recalentamiento del vapor: 10,5 MW(e).

El esquema de la Figura 11.38 reproduce, de manera escueta, el principio de funcionamiento de la citada incineradora en ciclo combinado con una turbina de gas natural.

En el caso de la turbina de gas, tratada como ciclo combinado convencional, las cifras de generación serían:

- Generación directa (ciclo simple de turbina): 43 MW(eléctricos).
- Gases de escape: $56,1 \cdot 0,25 = 14,03$ MW(eléctricos), en ciclo de Rankine.

La electricidad total generada en ciclo combinado convencional sería de 57,07 MW(e), que con otra turbina de vapor (un segundo ciclo de Rankine) a partir de los RSU en ciclo abierto: 12 MW(e), daría una potencia total de 69,07 MW(e). Pero el sistema no funciona de esta manera. La segunda caldera de

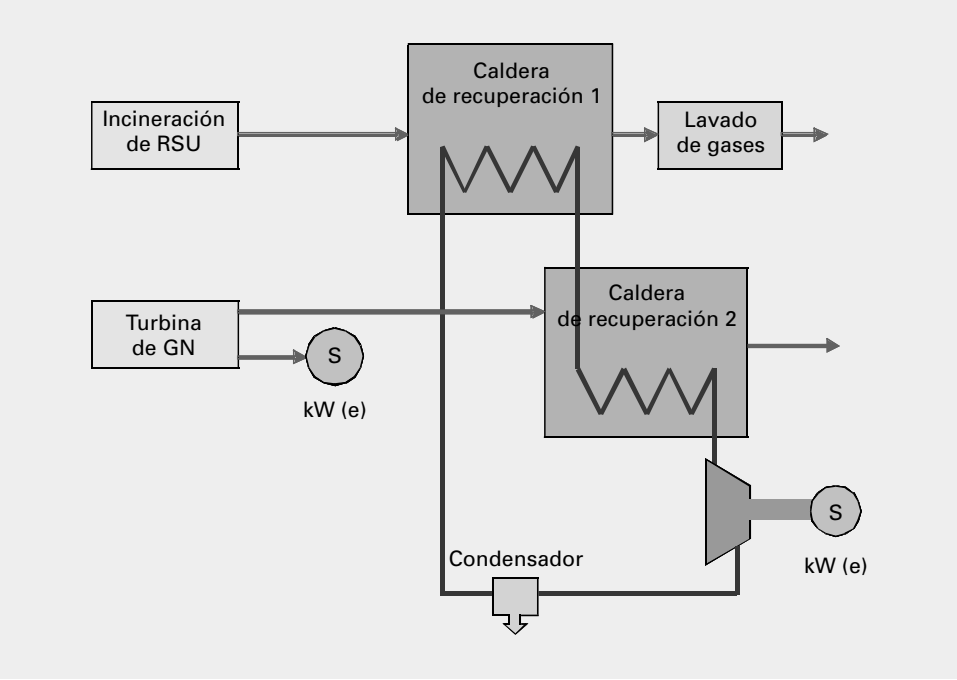


Figura 11.38. Principio de funcionamiento de una incineradora en ciclo combinado.

recuperación no tiene que vaporizar el agua (que supone el gran consumo de una caldera) ya que el vapor se genera en la primera caldera de recuperación. La segunda caldera se utiliza exclusivamente para recalentar el vapor con lo que el rendimiento de la turbina de vapor aumenta mucho, hasta 51 MW(e). En términos energéticos, el sistema se resume en:

- Energía térmica del GN: 107.000 KW(térmicos)
- Energía térmica de los RSU: 60.000 KW(térmicos)
- TOTAL: 167.000 KW(térmicos)

El rendimiento global de la transformación será:

$$\frac{95.000}{167.000} = 56,7\%$$

5.6.8. Los residuos de la incineración de RSU

De los residuos producidos en la incineración de RSU deben distinguirse dos grandes grupos con caracterizaciones y cantidades bien diferentes:

- Las escorias («*bottom ash*», en terminología anglosajona), corresponden a los impropios que se recogen en la parte inferior de la parrilla. A la vez también contienen parte de materia orgánica no quemada. Con ciertas restricciones se emplean como elemento de relleno para obras civiles.
- Las cenizas volantes («*fly ash*»), material particulado transportado por los gases y que es recuperado en el filtro de mangas. También existen las cenizas de la caldera, cuya cantidad depende del tipo de caldera. A diferencia de las escorias, las cenizas son consideradas residuos peligrosos y deben ser tratadas previamente a su salida de la planta de incineración.

5.6.8.1. Cantidades de escorias y de cenizas volantes

Las escorias surgen como consecuencia directa de la presencia de impropios (vidrios, metales, etc.) en el RSU y, en cantidad suponen entre el 20 y el 25% del RSU entrado en la incineradora. La progresiva implantación de la recogida selectiva en la mayoría de los países de la UE ha propiciado la disminución (en muchos casos entre el 15% y el 20%) de vidrio y metales en los RSU a incinerar, lo que tiene una doble ventaja: se producen menos escorias y el combustible tiene un PCI más elevado.

Las cantidades de cenizas volantes dependen de otros parámetros entre los que cabe destacar la forma de la parrilla, o del horno, el tipo de revestimiento del horno y la caldera y, sobre todo la legislación vigente. El RD 653/2003 sobre incineración esta-

blece los límites de emisión de gases. Las cenizas volantes son una mezcla de materia en suspensión, sales y carbón activo. Cuanto más estricta sea la legislación, más cenizas volantes se generarán. En el caso de la UE, la cantidad de cenizas se puede cifrar entre el 3,5% y el 5,5% del RSU tratado. De forma individualizada, un 2% procede de la caldera y el resto son polvos de filtro.

5.6.8.2. Las escorias y su valorización

El tratamiento para la valorización de las escorias de incineración consiste en una separación magnética seguida de una trituración. A continuación se establecen, por tamizado dos o tres tamaños de áridos para su uso en obra civil.

Para el uso civil, se suele emplear una distribución granulométrica entre 0 y 16 mm, lo que proporciona una densidad aparente de 1.000-1.100 kg/m^3, con un absorción media de agua del 2,5%. En los Países Bajos y Dinamarca casi el 50% de las escorias se emplea en el relleno de terraplenes. La capacidad de soporte inicial de las capas de escoria es algo inferior a las de la zahorra natural o artificial, pero con el tiempo las escorias se endurecen (básicamente por las reacciones puzolánicas que tienen lugar en su interior). Debido a estas propiedades en Alemania, casi el 40% de las escorias se usan como capas para subbases, en particular en carreteras secundarias ya que, a veces se han detectado problemas de hinchamiento ocurridos bajo capas delgadas de pavimento asfáltico, por esta razón en este país se exige una capa de mezcla bituminosa de, al menos, 16 mm. sobre la subbase.

Otra alternativa es la utilización de escorias estabilizadas con cemento, lo que indudablemente mejora sus propiedades mecánicas y, sobre todo, su resistencia a la lixiviación. En cambio las mezclas de escorias con betunes no han tenido tanto éxito debido a la débil ligazón que se establece entre las partículas de escoria y el betún. También hay problemas de mezclado.

Sin embargo, parece que la salida más lógica es el desarrollo de un modelo que permita la obtención de un árido apto para obra civil en general. Sobre este modelo, mas recientemente se ha desarrollado una variante que permite su mejor aprovechamiento y, sobre todo de una manera más segura desde el punto de vista ambiental (hay que tener en cuenta que las bajas temperaturas reinantes en el lecho de las parrillas favorecen los inquemados y la formación de organoclorados). El nuevo sistema se halla esquematizado en la Figura 11.39.

El proceso de valorización emplea una criba rotatoria (tromel) con agua (de esta manera la materia orgánica se separa fácilmente por flotación y se devuelve a la incineradora) y cribas planas para separar las fracciones más finas. Al final del proceso queda un lodo (aproximadamente el 10% de la escoria

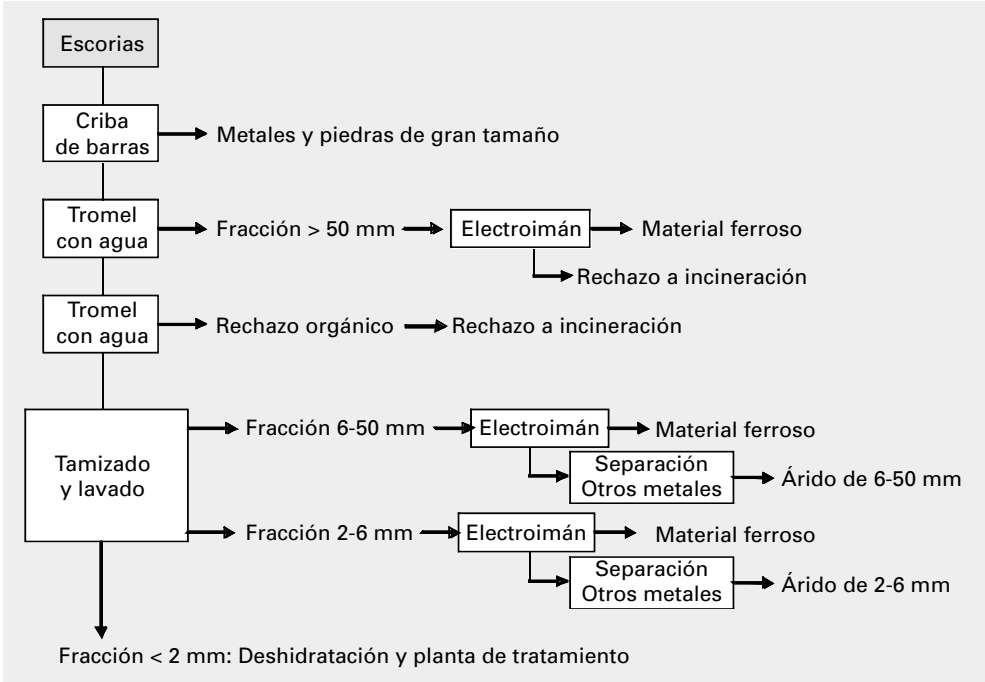


Figura 11.39. Valorización de escorias de RSU.

inicial) donde se separa la arena, se deshidrata y se lleva al vertedero. El resultado de la valorización es:

- Materiales férreos y no férreos: 10%
- Granulados: 45%
- Arenas: 35%
- Lodos: 10%

El VITO (*Flemish Institute for Technological Research*, de los Países Bajos) ha certificado la calidad de los materiales obtenidos por este sistema de manera que puedan ser valorizados como:

- *Metales:* como subproductos.
- *Granulados:* como áridos para obra civil y hormigones.
- *Arenas:* para estabilización y relleno de vertederos.

El sistema consume agua, para lavar los agregados y limpiarlos de sales, que se reusa en el propio proceso y en la incineradora. No hay vertido de aguas.

5.6.8.3. Las cenizas volantes. Tipos y tratamientos

Las cenizas volantes son residuos peligrosos, esencialmente por su contenido en metales, y entre ellas cabe distinguir:

- CVC. Cenizas volantes de caldera, es decir las que se recogen en la propia caldera.
- CV. Cenizas volantes, son las fracciones sólidas arrastradas por los gases y que no contienen ningún tipo de producto químico o agente corrector de emisiones.
- CVFM. Cenizas volantes que se recogen en el filtro de mangas que contienen, además los excesos de aditivos que se añaden para corregir las emisiones.

La Tabla 11.53 muestra la cantidad, en mg/kg de materia seca, de metales presentes en las diversas fracciones, incluyendo la escoria.

Es obvio que, a los contenidos de la tabla precedente se debe añadir el material particulado, las sales resultantes de las reacciones de neutralización, las trazas de materia orgánica y el carbón activo que se emplea para la adsorción de metales e hidrocarburos. Como es lógico, este panorama complica la valorización de las cenizas volantes.

En la UE, no se permite el vertido de cenizas volantes de incineración de RSU sin previo tratamiento en la planta.

Tabla 11.53. Metales en los residuos secundarios de incineradoras

Metal	Escoria	CV Caldera	Ceniza volante	Polvo de filtro
As	1-200	20-60	40-300	20-500
Ba	400-2.500	2.000-3.000	300-3.000	50-14.000
Cd	1-70	20-1.300	50-450	140-1.400
Co	20-50	20-200	10-90	1-300
Cr	20-3.000	200-1.000	140-1.100	70-600
Cu	300-8.000	500-1.000	600-3.200	10-2.400
Mo	2-300	20-40	15-150	2-40
Ni	100-600	100-1.500	60-260	20-700
Pb	100-14.000	1.000-35.000	5.300-26.000	2.500-22.000
Sb	10-400	200-1.000	260-1.100	80-1.100
Se	< 10	10-100	1-30	1-30
Sn	2-400	200-700	550-2.000	300-1.400
Zn	1.000-7.000	5.000-50.000	9.000-70.000	7.000-50.000

Lavado de cenizas de incineración: El lavado libera a las cenizas de una gran cantidad de sales. El agua de lavado se evapora y se hacen cristalizar las sales: SO_4Ca, ClNa, ClK, etc. Este sistema de tratamiento supone un elevado gasto energético, al margen de la solubilidad de alguno de los metales. Es por ello que el lavado suele hacerse a un pH ligeramente alcalino para evitar la solubilidad.

Procesos de estabilización y solidificación: Es el sistema más empleado para el tratamiento de las cenizas volantes. Todos estos procesos están encaminados a reducir la capacidad de lixiviación de los metales.

El proceso más usado es la adición de cemento, cal y, a veces, sílice amorfa. Las sales presentes en las cenizas son perjudiciales para el material estabilizado (con frecuencia inhiben o retardan el fraguado), con lo que algunos metales acaban lixiviando, en particular el Zn y el Pb. En cambio otras matrices de estabilización, como los fosfatos, garantizan un comportamiento mucho más seguro a la lixiviación.

Procesos de fusión y vitrificación: La fusión se diferencia de la vitrificación en que el sólido cristalino (la ceniza en este caso) pasa a la fase amorfa líquida (fusión) sin la ayuda de ningún aditivo. Normalmente, la composición de las cenizas no facilita la fusión y para ello es preciso alcanzar una temperatura muy elevada, lo que ocasiona emisiones indeseadas.

En cambio, en la vitrificación se añaden a las cenizas materias (básicamente cuarzo) que propician la

formación de vidrio a baja temperatura. El material resultante es mucho mejor y, modificando la composición del vidriado se puede lograr una estructura inatacable a ácidos y a bases.

Estos procesos son comunes en Japón. En la UE se están iniciando puesto que el precio de vertido es tan elevado que sale a cuenta vitrificar estos residuos y valorizarlos, en forma de áridos, para la formulación de hormigones.

Empleo para la producción de cemento de alinita: El cemento de alinita fue desarrollado en la antigua Unión Soviética al aislar un nuevo compuesto del clínquer de cemento que contenía Mg, Al_2O_3, y $CaCl_2$. Este compuesto se denomina alinita.

La principal característica tecnológica de este tipo de cemento es su baja temperatura de formación (alrededor de 1.000 °C) y sus excelentes propiedades ligantes. El proceso de producción de cemento de alinita consiste en la cocción de un crudo con una relación CaO/SiO_2 entre 2,3 y 3,2 y un contenido en cloruros entre 4,5 y 9,5% en términos de porcentaje en peso. Más que en aplicaciones estructurales se piensa en este tipo de cemento para la inmovilización de residuos peligrosos.

5.6.9. Las emisiones gaseosas de las incineradoras

En diferentes partes de este capítulo se ha explicado con detalle que los gases que se emiten en las modernas incineradoras urbanas de RSU, que existen en muchísimas ciudades de la UE, no representan problema alguno para la población.

Quizás el único impacto, por fortuna cada vez menor, lo constituya el mercurio. Como es bien sabido, se trata de un metal pesado extremadamente volátil y muy dañino. En la actualidad existe una variante de carbón activo que incorpora azufre, de manera que cuando el Hg es adsorbido se forma cinabrio (sulfuro de mercurio, que es tal como se extrajo de la naturaleza) que es una forma estable y no hay otra alternativa que depositarlo en un vertedero de seguridad.

5.6.10. Aspectos sociales de la incineración de RSU

En los países del área mediterránea de la UE, la incineración se halla contestada socialmente. La Figura 11.40 muestra el panorama de los países europeos donde se nota una marcada tendencia que indica que los países que más incineran son también los que más reciclan (en la mayoría de países de la UE la incineración con recuperación de energía está considerada como una valorización, en contraposición al vertido).

En la figura, el eje de ordenadas indica la cantidad de RSU incinerados por persona, mientras que el de abscisas muestra la protección social en € por persona (× 1.000). Por otra parte es evidente que existe una correlación directa entre la calidad de las emisiones y la protección social, lo que viene a demos-

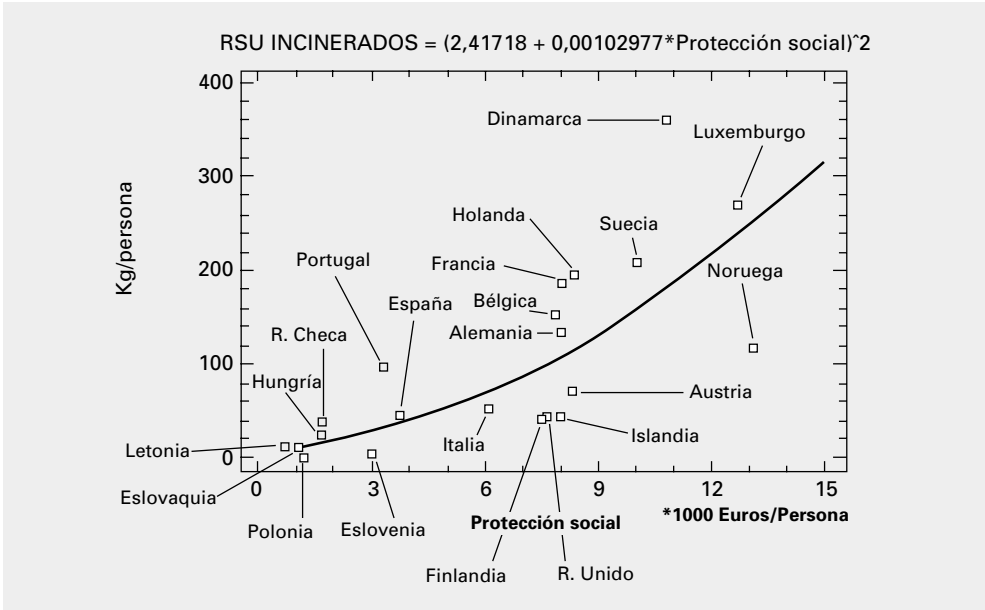


Figura 11.40. Relación de RSU incinerados Vs. Protección Social (Fuente Eurostat 2003).

Tabla 11.54. Comparación de emisiones al aire (Fuente Viena University of Technology)

	PCDD PCDF (kg/a)	CO_2 (t/a)	NO_x (t/a)	SO_x (t/a)	Cd (t/a)	Hg (t/a)	Partículas (t/a)
AUSTRIA							
Total emisiones	0,05245	89.670.000	204.487	35.962	1	1	84.807
Emisiones en incineradoras	0,00002	268.894	304	15	0	0,01	3,33
	0,04%	0,39%	0,15%	0,04%	0,25%	1,04%	0 01%
ALEMANIA							
Total emisiones	0,309	859.000.000	1.499.499	610.596	11	28	208.965
Emisiones en incineradoras	0,00038	4.926.187	5.573	277	0,05	0,18	61,03
	0,12%	0,57%	0,37%	0,05%	0,43%	0,65%	0,03%
SUECIA							
Total emisiones	0,04453	54.752.880	242.030	57.942	0,52	1	87.168
Emisiones en incineradoras	0,00005	607.252	687	34	0,01	0,02	7,52
	0,11%	1,11%	0,28%	0,06%	1,12%	3,32%	0,01%
ITALIA							
Total emisiones	0,2395	468.960.850	1.316.570	709.270	16	10	400.000
Emisiones en incineradoras	0,0001	1.276.403	1.444	72	0,01	0,05	15,81
	0,04%	0,27%	0,11%	0,01%	0,08%	0,47%	0,00%
REP.CHECA							
Total emisiones	0,6204	123.047.960	318.230	237.382	2,74	2,76	76.101
Emisiones en incineradoras	0,00002	234.870	266	13	0	0,01	2,91
	0,00%	0,19%	0,08%	0,01%	0,08%	0,31%	0,00%
NORUEGA							
Total emisiones	0,03142	40.945.150	212.978	22.074	1	1	77.104
Emisiones en incineradoras	0.,0002	320.786	363	18	0	0,01	3,97
	0,08%	0 78%	0,17%	0,08%	0,45%	1,30%	0,01%
PROMEDIO	**0,07%**	**0 55%**	**0,19%**	**0,04%**	**0,40%**	**1,18%**	**0,01%**

trar que la incineración, cuando se toman todas las medidas de depuración, no es una tecnología contaminante (Para ampliar datos puede consultarse la web: *bmu.de/english/waste*, versión inglesa del Ministerio Alemán de Medioambiente).

Según el Ministerio Federal de Medioambiente, Conservación de la Naturaleza y Seguridad Nuclear de Alemania se tiene registrado que, en la década de 1980 las plantas incineradoras del país se convirtieron en un símbolo de contaminación ambiental y los ciudadanos comenzaron a oponerse a la sociedad de «usar y tirar» y a las emisiones de dioxinas provocadas por la deficiente depuración en la incineración de los RSU. Según la misma fuente, actualmente se reciclan más de la mitad (55%) de todos los RSU domésticos (fracción fermentable, papel, vidrio y envases) y las plantas incineradores han dejado de ser importantes fuentes de emisiones de dioxinas, polvo y metales pesados.

La Tabla 11.54 muestra la comparacion de las emisiones al aire de diversos contaminantes en el país y las correspondientes a las plantas de incineración en algunos paises de la UE.

La media aritmética de los valores que aparece en la última fila de la Tabla 11.54 son bien reveladores en todos los apartados: las emisiones procedentes de las incineradores son insignificantes en relación a las otras actividades. Por lo general, el 60% de las emisiones de la mayoría de los contaminantes, proceden de la industria. La incineración, después de la industria nuclear, es la tecnología mas reglamentada, ello explica su eficacia en términos de contaminación, sin embargo no deja de ser un agravio comparativo con respecto las otras actividades industriales y domésticas.

Tabla 11.55. Fuentes de dioxinas en EE UU a través del tiempo (Fuente: *Toxic Release Inventory: Quantified U.S. Dioxina soflrces over time*)

Fuente	1987	1995	2002/2004
Plantas de incineración con recuperación de energía	8.877	1.250	12
Centrales térmicas de carbón	51	60	60
Incineradoras de residuos médicos	2.590	488	7
Combustión de residuos en hornos y parrillas particulares de forma incontrolada	604	628	628
Total	**13.998**	**3.225**	**1.106**

La Tabla 11.55 muestra las principales fuentes de emisión de dioxinas y furanos (en g/año) en EE UU a lo largo del tiempo.

La Tabla 11.55, en un escenario circunscrito a la emisión de organoclorados, viene a reafirmar lo mismo: la emisión procedentes de la incineración solo representan el 0,017% del total.

5.7. COINCINERACIÓN

La coincineración consiste en el uso de materiales residuales como combustibles en aquellos procesos industriales que demandan mucha energía y que habitualmente utilizan combustibles convencionales, como por ejemplo las plantas cementeras. En Europa la legislación no permite que el residuo aporte más del 40% de la potencia.

La figura de la coincineración para el tratamiento de residuos se crea para regularizar el uso de combustibles residuales en hornos de proceso. No es normal construir plantas de coincineración como postula el Real Decreto 653/2003. Las plantas de proceso ya existen y hay que buscar la manera que la cocombustión con residuos sea compatible con el medio ambiente.

Por diversos motivos las instalaciones industriales mas usadas para la práctica de la coincineración, empleando diferentes residuos, son:

- Los hornos de clínquer (usando residuo como materia prima, como combustible y como aditivo al clínquer).
- Los de vidrio (pero usando residuo como materia prima).
- Los de agregados ligeros (usando residuo como materia prima y residuo como combustible).
- Los de cal (usando residuo como materia prima y residuo como combustible).
- Los de ladrillería (usando residuo como materia prima y residuo como combustible).

En el caso de los RSU, su empleo queda restringido a los hornos de clínquer. Además, el RSU (mejor pretratado habiendo segregado el metal, el vidrio y parte del fermentable) debe peletizarse previamente.

5.8. PIRÓLISIS

La pirólisis es el calentamiento de materia orgánica en ausencia de oxígeno. El calor, que alcanza un nivel térmico de 500-700 °C, rompe los enlaces de las grandes moléculas orgánicas y las transforma en moléculas de menor tamaño, generalmente gases y vapores. Es apropiada principalmente para residuos sólidos y líquidos con PCI medio-alto y para aplicar a suelos contaminados por hidrocarburos.

Desde el punto de vista del aprovechamiento energético, son los gases de pirólisis los que se valorizan sin problemas y los vapores, mientras están en esta fase, también. Si, en cambio, por descenso de la temperatura los vapores condensaran en forma de líquidos (aceites pirolíticos), la valorización se complica.

El proceso de pirólisis genera una gran cantidad de coque, entre el 30-70% del peso del residuo de entrada, donde se concentran los metales y los principales contaminantes, lo que obliga a realizar posteriormente una valorización del coque por incineración. Esto es especialmente difícil dado que el coque ha perdido los compuestos volátiles. El hecho de trabajar a una temperatura relativamente baja evita la volatilización de los metales, aunque como inconveniente éstos serán transferidos al coque, circunstancia que limita sus posibilidades de valorización y que, a su vez, hará más complicada la incineración.

Cuando el residuo a tratar es mayoritariamente orgánico parece aconsejable usar la gasificación, mientras que si la presencia de materiales inorgánicos es importante sería conveniente decantarse por un proceso de pirólisis. Ello abre un amplio abanico de nuevas posibilidades al empleo de la pirólisis.

Un ejemplo bien representativo de lo dicho lo constituye el residuo de las plantas de envasado de conservas de productos de la mar, como los mejillones. Una vez procesado el mejillón, el residuo de los

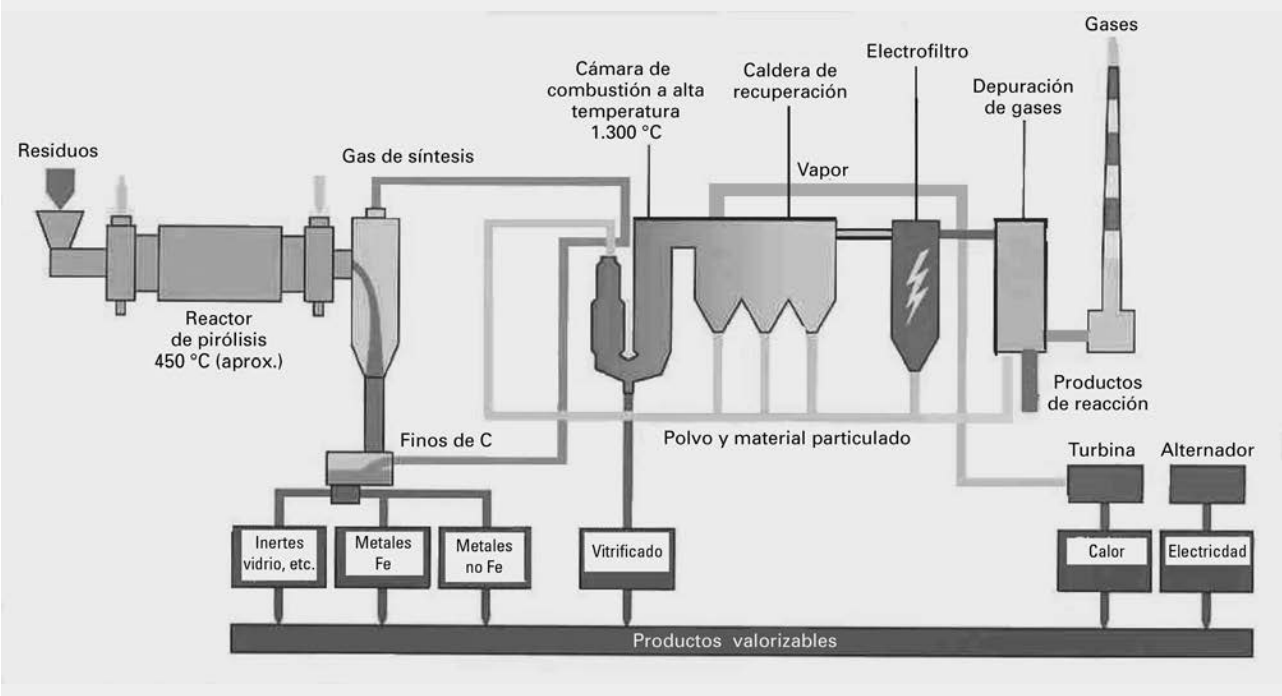


Figura 11.41. Esquema de un pirolizador de RSU con lavado de gases.

bivalvos, las conchas, todavía contiene una parte importante de materia orgánica. El sistema más adecuado de tratamiento sería la pirólisis, ya que alcanza una temperatura suficiente para destruir los restos de materia orgánica pero insuficiente como para estropear la inorgánica. Esta es básicamente caliza y si no se alcanzan los 700 °C permanece como tal y puede ser un subproducto valioso en la industria del cemento, por ejemplo, como materia prima alternativa de la caliza que de otra manera procede de canteras.

La experiencia ha demostrado que cuando la pirólisis se combina con la incineración, resulta un proceso que termina por no dejar residuos secundarios.

Como ya se ha comentado al inicio de este capítulo, los procesos térmicos, a excepción de la incineración (De hecho la incineración, como proceso de conversión de materia orgánica, también precisa de una preselección. Lo que acontece es que al haberse desarrollado hornos de parrilla diseñados para el «todo uno», se tiende a decir que no es necesario el triaje previo), precisan de una preselección más o menos importante y la pirólisis no es una excepción. Por lo general, no se piroliza el RSU en masa sino una o varias fracciones del mismo. La Tabla 11.56 muestra los productos de pirólisis de diversas fracciones del RSU.

Tabla 11.56. Productos de la pirólisis de diversas fracciones del RSU.

Residuo	°C proceso	Calentamiento °C/min	% Gas	% Líquido	% Coque
Madera	600	20	27,0	50,4	22,6
Neumáticos	600	20	6,8	54,0	39,2
RDF	600	20	18,8	49,2	35,2
Plásticos (mezclados)	700	25	9,6	75,1	2,9

En el DVD adjunto, en el punto 14, se muestra información sobre sistemas de pirólisis convencionales de RSU.

5.9. GASIFICACIÓN

El proceso se podría definir como un estadio intermedio entre la pirolisis y la incineración, debido a que es una oxidación parcial de la materia orgánica del residuo.

Añadiendo una pequeña cantidad de aire, entre el 30-70% del oxígeno estequiométrico, una parte del residuo combustiona y proporciona el calor necesario para iniciar la cadena de reacciones endotérmicas que supone la gasificación.

En el interior del reactor de gasificación se llevan a cabo un conjunto heterogéneo de reacciones de pirolisis, gasificación y combustión que culminan en la generación de un gas de síntesis que, a diferencia del gas de pirolisis, tiene un bajo poder calorífico. Este inconveniente desde el punto de vista energético es ampliamente superado por las ventajas ambientales de no generar residuos, ya que toda la materia orgánica pasa al gas de síntesis.

En caso de valorizar el gas de síntesis en motores de cogeneración, debido a que el gas debe entrar frío en el motor, condensan la mayor parte de los alquitranes presentes y pasan a las aguas de proceso. En la hipótesis de valorizar el gas por combustión estos alquitranes no supondrían ningún problema.

Existe una aplicación, en funcionamiento desde 1990, directa del gas de síntesis a partir de la gasificación de pelets de RSU, una vez eliminada la fracción fermentable y parte de los inertes, que consiste en su introducción en un horno de clínquer.

Actualmente hay algunas plantas de pequeño tamaño dedicadas a la gasificación de biomasa, puesto que la composición y el PCI es más homogéneo y facilita el proceso. Otras instalaciones para la gasificación de residuos, como los plásticos, que resultarían de gran interés, se puede considerar que están todavía en fase de perfeccionamiento debido a la complejidad del proceso. La Figura 11.42 muestra un esquema para la generación de electricidad en motores de cogeneración a partir de la gasificación de pelets de RDF.

La gasificación de RDF planteada en la Figura 11.42 tiene un rendimiento de conversión en teoría muy aceptable, puesto que el rendimiento desde el PCI del combustible hasta el gas de síntesis a la salida de la torre de enfriamiento es del orden del 70% (en la torre de enfriamiento los alquitranes presentes en el gas de síntesis condensan y pasan a las aguas de proceso que deberán tratarse en una EDAR). Los motores de cogeneración que funcionan con gas pobre tienen un rendimiento alrededor del 38%, por lo que el rendimiento global del sistema es del 26,6%. A ello habría que añadir el aprovechamiento de los gases calientes a la salida del motor, lo que mejoraría el rendimiento. Por el contrario es preciso pensar en los costes de mantenimiento de la EDAR y el de tratamiento de los fangos generados, donde se hallan la mayoría de los alquitranes generados.

Sin embargo, existe una variante del sistema que combina la gasificación con el ciclo de Rankine convencional. En el proceso, el gas de síntesis que abandona el gasificador a una temperatura de 700 °C, se valoriza en una cámara de oxidación, seguida de una de postcombustión antes de penetrar en la caldera de recuperación. En este caso el rendimiento hasta la entrada en la caldera es muy elevado, del orden del 95%. El resto de la instalación se comporta como un ciclo de Rankine, es decir con un 20% de rendimiento de la conversión eléctrica. En total, el 19%.

La comparación de ambas variantes, en términos estrictos de rendimientos de conversión, sería:

- Gasificación y generación de electricidad en motor de cogeneración: 26,6%.
- Gasificación y generación de electricidad en ciclo de Rankine: 19,0%.

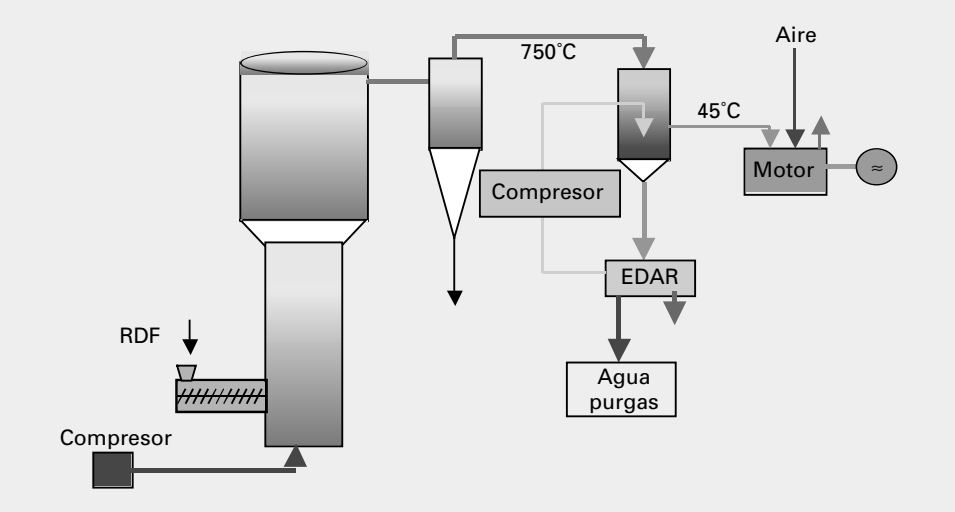


Figura 11.42. Esquema de un proceso de gasificación.

No obstante, si se valoran otros parámetros como: coste energético preciso para el enfriamiento del agua de proceso, gestión de la EDAR y el tratamiento de los lodos del proceso, en términos económicos la diferencia entre uno y otro sistema se acorta y, a veces, se igualan.

La Figura 11.43 muestra un gráfico donde se compara el poder calorífico de los diversos gases de síntesis en comparación con el metano, el compuesto combustible presente en todos ellos.

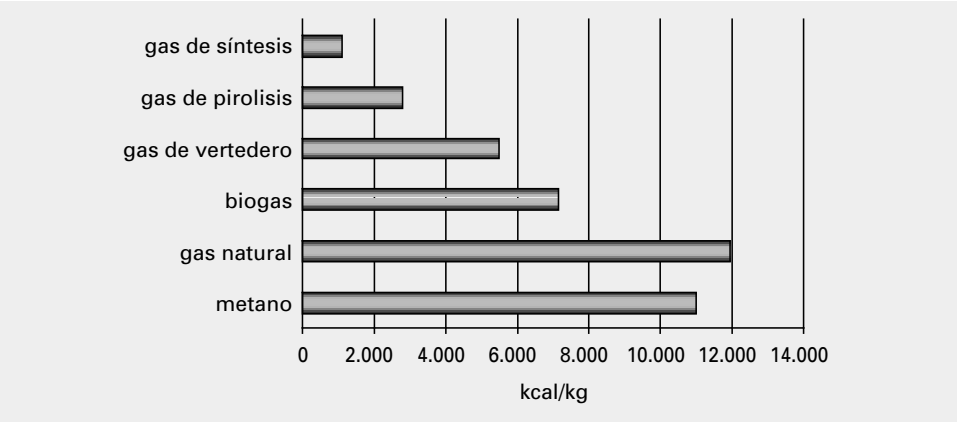


Figura 11.43. PCI de diversos gases de síntesis.

6. Sistemas de conversión bioquímicos de los RSU

El contenido de este apartado va destinado a los tratamientos bioquímicos de la fracción orgánica de los RSU, en especial la fermentable.

En función de la recogida de los residuos se obtendrán fracciones más o menos contaminadas, lo que determinará la tecnología adecuada para la valorización de la fracción fermentable:

- *Recogida selectiva:* Da lugar a residuos homogéneos. A esta clase sólo corresponden aquellas fracciones que se segregan en origen, ya sea la fracción fermentable de los RSU en las ciudades, o en restaurantes o bien en los mercados de abastos centrales.
- *Fracciones separadas de la recogida en masa:* Corresponden a la misma naturaleza que el caso anterior pero con la alta probabilidad de que contengan compuestos contaminantes en mayor o menor grado. Dependiendo del grado de contaminación se podrán valorizar mediante una u otra técnica.
- *Recogida específica:* Produce residuos no mezclados, homogéneos pero contaminados. Corresponden a los grupos de residuos procedentes de actividades industriales, como los purines, los fangos de EDAR, etc.
- *Recogida en masa sin separación.* Se trata de residuos que están compuestos por toda clase de contaminantes y tamaños. Su destino difícilmente no puede ser otro que el vertedero.

De todo lo dicho anteriormente se deduce que para llevar a cabo el óptimo tratamiento de la fracción fermentable, se puede establecer una clasificación de las tecnologías a aplicar en función del grado de contaminación del residuo de partida y su homogeneidad, como muestra el diagrama de la Figura 11.44.

Como se desprende de la Figura 11.44, la calidad de la selección y en particular la recogida selectiva es susceptible de determinar el sistema de tratamiento de la fracción fermentable más adecuado.

Si la recogida selectiva es efectiva el objetivo principal del tratamiento es la higienización de los posibles gérmenes patógenos presentes. Por orden de pureza del residuo disponible, los procesos más adecuados serán:

- *Pasteurización.* Como el producto resultante va a ir destinado a la alimentación de animales, la garantía higiénica debe ser total. Por esto la tipología de residuos más indicada serán los procedentes de plantas de envasado de frutas,

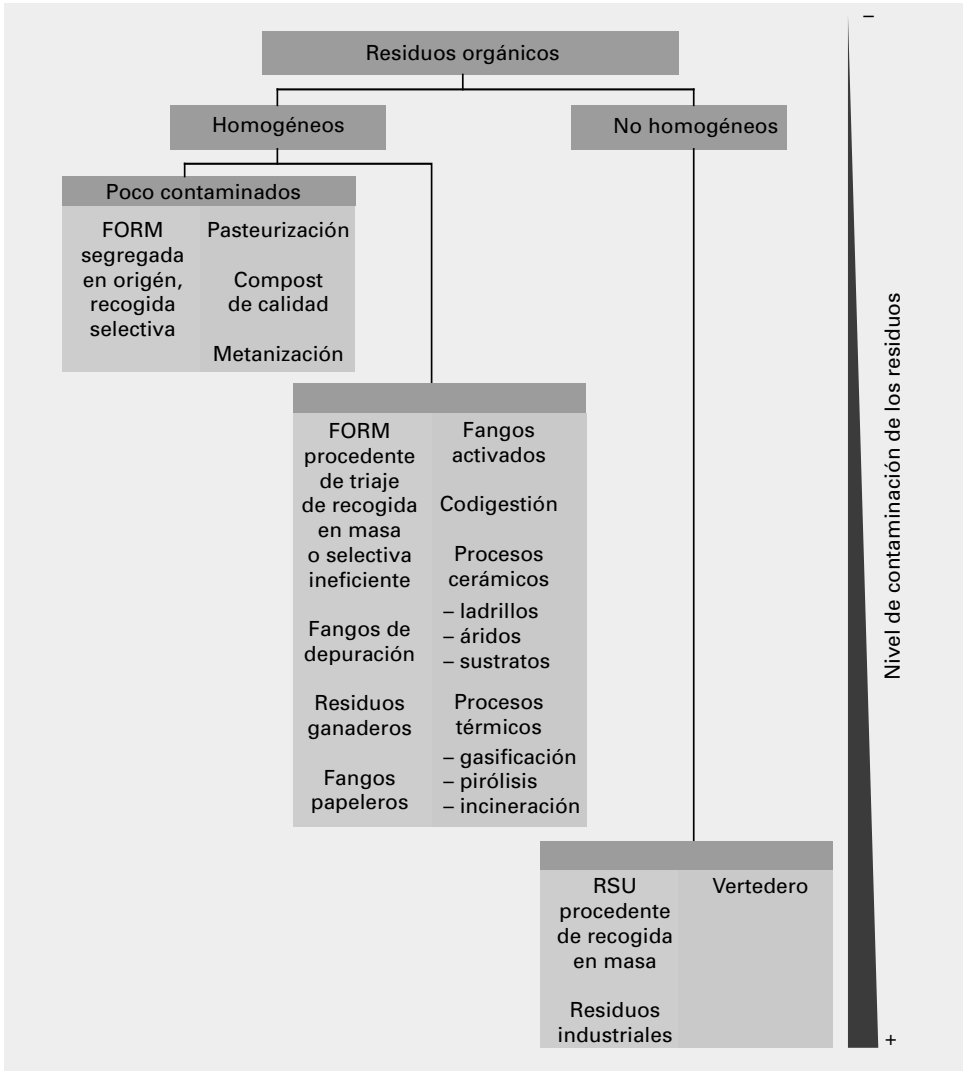


Figura 11.44. Posibilidades de tratamiento de las fracciones orgánicas.

grandes mercados de abasto, fabricación de bebidas: lácteas, fermentables, etc.

- *Compost de calidad.* Puesto que se trata de un compost que puede tener aplicaciones agrícolas, la garantía higiénica ha de ser elevada. Por ejemplo, el residuo que procede de una planta de metanización que, a su vez, se nutra de recogida selectiva de fracción fermentable.
- *Metanización.* La importancia de la higienización primaria del residuo es secundaria comparada con el caso de la pasteurización. De hecho el principal objetivo del proceso es conseguir biogás sin presencia de inhibidores para los metanizadores y ello presupone una «materia prima» limpia, o sea procedente de recogida selectiva.

La Figura 11.45 muestra el resumen de las diversas posibilidades.

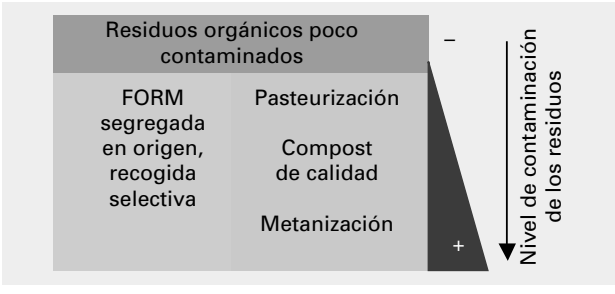


Figura 11.45. Resumen de posibilidades de las fracciones orgánicas.

6.1. LOS RESIDUOS FERMENTABLES

Si bien la cantidad de materia orgánica en los RSU sigue disminuyendo en términos relativos en todos los países de la UE, lo cierto es que permanece constante en términos absolutos alrededor de los 600 g/persona y día, o 220 kg/persona y año.

La fracción orgánica es la que mayores problemas ocasiona desde el punto de vista ambiental y ello, en el caso de la UE, se ve incrementado por diversos motivos:

- La práctica totalidad de la UE es zona lluviosa, el mayor inconveniente para el vertido puesto que aumenta el volumen de lixiviados y por tanto las posibilidades de liberar contaminantes al medio.
- Está densamente poblada y las aglomeraciones urbanas se encuentran en zonas de poca altitud, lo que comporta que los vertederos, cercanos a los núcleos de población, se sitúen en terrenos donde el nivel freático está próximo a la superficie, aumentando el riesgo de contaminación.
- La población es reacia a la presencia de instalaciones de tratamiento de residuos y la presión popular para evitar los vertederos es cada vez más importante.

Los residuos degradables se podrían clasificar, en primera aproximación, en:

- Residuos de rápida degradación: Residuos de comida, residuos de jardín, papel y en menor proporción el cartón.
- De lenta (a veces nula) degradación: plásticos, gomas, cueros, maderas, etc.

Las características de la fracción orgánica de los residuos municipales son función de multitud de factores y varían de un municipio a otro, de una estación a otra y hasta entre barrios de una misma ciudad, por lo cual es difícil establecer unos estándares. La Tabla 11.57 reproduce una caracterización típica de los mismos.

La Tabla 11.57 reproduce el análisis de contaminantes de algunas de las fracciones fermentables más comunes presentes en los RSU, sin embargo es más frecuente referirse al análisis inmediato, como reproduce la Tabla 11.42 (en porcentaje en peso), ya que es mucho más fácil de realizar. En el análisis inmediato caracteriza:

- La humedad.
- La materia volátil que es la que proporciona una idea de la biodegradabilidad.
- El carbono fijo.
- La cantidad de ceniza, o materia no combustible.

Tabla 11.57. Análisis elemental típico de contaminantes en las fracciones fermentables de los RSU

Elemento	Unidad	Papel periódico	Papel oficina	Restos jardín	Restos comida
NO_3- N	ppm	4	218	490	4.278
P	ppm	44	295	3.500	4.900
PO_4- P	ppm	20	164	2.210	3.200
Ca	%	0,01	0,10	0,42	0,43
Mg	%	0,02	0,04	0,21	0,16
Na	%	0,74	1,05	0,06	0,15
K	%	0,35	0,29	2,27	4,18
B	ppm	14	28	88	17
Se	ppm	—	—	< 1	< 1
Zn	ppm	22	177	20	21
Mn	ppm	49	15	56	20
Fe	ppm	57	396	451	48
Cu	ppm	12	14	7,7	6,9
Co	ppm	—	—	5	3
Ni	ppm	—	—	9	4,5

Otra manera de expresar la caracterización del residuo es mediante la fórmula química equivalente, como se expone en la Tabla 11.58. En dicha tabla se parte de la fórmula teórica del residuo y, a partir de ella se deduce el análisis elemental de los principales componentes.

Tabla 11.58. Análisis químico y elemental típico de fracciones fermentables de los RSU

Residuo	Fórmula	% C	% H	% O	% N
Madera	$C_{295}H_{420}O_{186}N$	51,05	6,05	42,68	0,20
Grasa	$C_{23}H_{38}O_{17}N$	46,00	6,33	45,33	2,33
Bacterias	$C_5H_7O_5N$	37,26	4,34	49,68	8,69
Hongos	$C_{10}H_{17}O_6N$	48,58	6,88	38,86	5,66
Carbohidratos	$(C_6H_{10}O_5)_X$	44,44	6,17	49,38	0
Proteínas	$C_{16}H_{24}O_5N_4$	54,54	6,81	22,72	15,90
Grasas y aceites	$C_{50}H_{90}O_{10}N$	69,44	10,41	18,51	1,62
Fango primario	$C_{22}H_{39}O_{10}N$	55,34	8,17	33,54	2,93
Fango secundario	$C_{10}H_{19}O_3N$	59,70	9,45	23,88	6,96
Fracc. orgánica RSU	$C_{64}H_{104}O_{37}N$	51,96	7,03	40,05	0,94

Se aprecian diferencias entre composiciones según las fuentes consultadas, ya que de la mayoría de materiales existen infinidad de variedades, por eso la tabla precedente se refiere a una media de las especies más comunes.

6.2. TIPOS DE RESIDUOS FERMENTABLES

Dentro de los llamados residuos orgánicos existe una infinidad de variedades que han sido descritos en el apartado 4.2.3.

6.3. PROPIEDADES BIOLÓGICAS DE LOS RSU

Desde el punto de vista químico, la fracción orgánica de los RSU, excluyendo el plástico, la goma y el cuero, materiales no aptos para los sistemas aquí tratados, pueden clasificarse como:

- Constituyentes solubles en agua: como los azúcares, féculas, algunos ácidos orgánicos y aminoácidos. Esta propiedad es fundamental para la biodegradabilidad y por lo tanto el impacto que puede provocar cuando se deposita en un vertedero.
- *Productos celulósicos.* Son componentes típicos del papel y la madera, no obstante no siempre provienen de ella. La hemicelulosa es un producto de síntesis de azúcares que contiene cinco carbonos, mientras que la celulosa está formada por seis. Esta diferencia hace a la celulosa, mayoritaria en la madera, de más difícil degradación.
- *La lignina.* Se trata de un típico componente del papel y la madera. Es un polímero que contiene anillos aromáticos con grupos metoxi (-OCH_3), cuya fórmula final no es bien conocida. La lignocelulosa es una combinación de la celulosa y la lignina. De los componentes habituales de los RSU, la lignina es la menos biodegradable.
- *Grasas y aceites.* Productos típicos de la fracción residual de la comida. Muchos de ellos no son fermentables. La mayoría son ésteres de alcoholes y ácidos grasos de cadena larga.
- *Proteínas.* Formadas básicamente por cadenas de aminoácidos.

La propiedad más sobresaliente desde la óptica de la valorización es que casi todos los componentes presentes pueden ser convertidos biológicamente en gases y sólidos orgánicos e inorgánicos razonablemente inertes.

6.3.1. Biodegradabilidad de los componentes

El fenómeno de la volatilización marca la pauta de la degradabilidad y se produce en muchas áreas de la ingeniería ambiental, entre las que cabe destacar:

- Liberación de COV's a la atmósfera a partir de tanques y lagunas de aireación de aguas residuales y EDAR.
- Vertederos, plantas de tratamiento de residuos orgánicos o sitios incontrolados de acumulación de residuos.

Los factores que influyen en la volatilización son el peso molecular, la concentración del COV, el coeficiente de difusión a través del agua y la temperatura.

La mayoría de los COV's son hidrocarburos que contienen únicamente carbono e hidrógeno y se dividen en alifáticos (algunos alicíclicos) y aromáticos, aunque la legislación de emisiones de COV pueda englobar otras sustancias recogidas por los métodos de muestreo y control de estos compuestos. Los compuestos aromáticos son los más preocupantes desde el punto de vista ambiental, son perjudiciales para la salud y al no ser muy reactivos son de más difícil degradación. Menos abundantes, aunque más activos, son el óxido de etileno, formaldehído, fenol o fosgeno, entre otros. En datos de 1985, la emisión de COV's per capita (kg/año) en la UE fue de 15 kg teniendo en cuenta tan sólo los procedentes de los vertederos.

El contenido en sólidos volátiles (SV), determinado a 550 °C, se utiliza frecuentemente como medida de la degradabilidad de la materia orgánica de los RSU. Una fórmula muy usada para medir la fracción biodegradable (FB), en función de dos constantes empíricas y del contenido de lignina (CL), compuesto muy poco degradable, es:

$$FB = 0{,}83 - 0{,}028\ CL$$

La Tabla 11.59 clasifica la biodegradabilidad de algunos integrantes de los RSU a partir de la anterior fórmula.

Tabla 11.59. Biodegradabilidad de algunos componentes de los RSU

Componente	% de SV (sólidos volátiles) respecto total	Contenido lignina respecto SV	FB
Restos comida	7-15	0,4	0,82
Papel periódico	94	22	0,22
Papel oficina	96,5	0,4	0,82
Cartón	94	13	0,47
Residuos jardín	50-90	4	0,72

De esta manera se puede expresar matemáticamente el grado de biodegradabilidad, según lo elevado que sea el valor resultante.

6.3.2. Producción de olores

El clima en general y la temperatura ambiente en particular juega un papel determinante en el desarrollo de los olores. Por lo general el olor se genera por descomposición anaerobia de parte de la fracción fermentable presente en los RSU. Así, los sulfatos con ácido láctico, en condiciones anaerobias, dan lugar a ácido acético y sulfuro que más tarde formará ácido sulfhídrico.

Por la misma razón, si el ión sulfuro se combina con los metales en lugar de con el hidrógeno, da lugar a sulfuros metálicos y a ello se debe el típico color negro de los RSU en los vertederos.

La reducción bioquímica de un compuesto orgánico que tiene un radical de azufre puede causar la formación de compuestos malolientes, con un umbral de percepción muy bajo, como el metilmercaptano o el ácido aminobutírico.

6.3.3. Aspectos nutricionales

Cuando el destino de la fracción segregada del RSU es la aportación de nutrientes para elaborar compost de calidad, es importante conocer, como indica la Tabla 11.60, el análisis elemental de los materiales orgánicos que habitualmente se emplean y la relación C/N de diferentes residuos.

Tabla 11.60. Relación C/N

Nitrógeno y relación C/N en diversas materias			
	Material	**% N_2**	**C/N**
Residuos de comida	Fruta	1,52	34,8
	Mataderos	7-10	2
Estiércoles	Vaca	1,7	18
	Cerdo	3,75	20
	Aves	6,3	15
	Oveja	3,75	22
Fangos activados	Digeridos	1,9	15,7
	Crudos	5,6	6,3
Madera y paja	Aserrín	0,1	200-500
	Paja de trigo	0,3	130
	Madera de pino	0,7	725
Papel	Mezclado	0,25	175
	Periódico	0,05	980
	Revistas	0,07	470
Residuos de jardín	Césped	2,15	20
	Hojas caídas	0,5-1	40-80
Biomasa	General	1,95	21

6.4. COMPOSTAJE

A pesar de que el compost es un producto habitual, no fue hasta que la Unión Europea reguló la obligación de gestionar la materia orgánica y no verterla que se iniciaron las actividades de compostar correctamente los residuos. Originariamente, los residuos que se compostaron fueron los fangos procedentes de la depuración biológica de las aguas residuales urbanas. Posteriormente, el interés por tratar de manera específica la fracción orgánica de los RSU hace que las autoridades tiendan a implantar instalaciones tecnológicas que apliquen la metanización y el compostaje, por este orden, a estos residuos. Esta implantación, gradual y lenta, no está exenta de polémica debido a la problemática asociada al funcionamiento de este tipo de plantas.

Al ser todavía un sistema de gestión con poca implantación, los resultados obtenidos en diferentes instalaciones y distintas zonas geográficas son poco generalistas, por lo que se indican a continuación citando datos del programa de recogida de FORM del área metropolitana de Barcelona.

El área metropolitana de Barcelona es la región más densamente poblada de Cataluña, la componen 33 municipalidades. La recogida selectiva de FORM en un área de 113 km^2, con 137.000 habitantes en 55.000 domicilios distribuidos en 4 municipios produjo 10.700 t de residuos anualmente, generando 2.000 t anuales de compost. La Tabla 11.61 expone, a nivel de la UE, y en datos de 2001, las cantidades de compost producidas (la última columna parte de la base de que se emplea un 6% de la superficie de la UE).

El compostaje es un proceso biológico en el que parte de la materia orgánica es metabolizada a CO_2 y H_2O en presencia de oxígeno. Es un proceso exotérmico y precisa de una cierta cantidad de agua y de aireación para mantener la humedad, oxígeno disponible y la temperatura por debajo de los 60-65 °C, condiciones que permiten la actividad de los microorganismos compostadores aerobios.

Es un proceso apto para el tratamiento de residuos con elevado contenido de materia fermentable seca. Una vez maduro, el compost se aplica al campo donde la humedad del medio y los microorganismos

Tabla 11.61. Producción real y potencial de compost

País	Producción (2001). Millones t/año	Producción potencial. Millones t/año	Capacidad para usos agrícolas. Millones t/año
Alemania	2,4	4,5	7,1
Austria	0,5	1,0	0,9
Bélgica	0,2	0,7	0,4
Dinamarca	0,3	0,5	1,5
España	0,5	3,5	9,5
Francia	0,3	7,0	10,7
Italia	0,3	5,0	6,0
Países Bajos	0,6	0,7	0,5
Reino Unido	0,2	4,6	4,2
Suecia	0,1	0,8	1,8

acaban de mineralizar ciertos compuestos difícilmente degradables, como la lignina.

Una definición actualizada y aceptada del proceso de compostaje es la siguiente: «Descomposición biológica y estabilización de un sustrato orgánico, bajo condiciones que permitan el desarrollo de temperaturas en el rango termófilo como resultado del proceso biológico aerobio exotérmico, para producir un producto final estable, libre de patógenos y semillas, y que pueda ser aplicado al suelo de forma beneficiosa». Este producto final es estable y beneficioso para el suelo, y el sustrato orgánico o materia prima a la que se aplica el proceso puede ser cualquier residuo orgánico biodegradable.

El hecho que prácticamente todos los residuos orgánicos composten si se dan unas mínimas condiciones de composición, humedad y porosidad, hace que se considere una práctica simple y sin complicaciones tecnológicas. Esta aparente simplicidad esconde en realidad un proceso complejo, en el cual intervienen multitud de factores, y no puede considerarse bien realizado si no se obtiene finalmente un producto estable y beneficioso para suelos y cultivos.

En resumen, el proceso de compostaje está constituido por dos fases consecutivas: descomposición y maduración. En la primera, diferentes poblaciones de bacterias, actinomicetes y hongos, trabajando de forma simultánea o consecutiva, descomponen los constituyentes de la materia orgánica, hidratos de carbono, proteínas y lípidos, estableciéndose relaciones de sinergia en algunos casos y de competencia por el sustrato en otros. En medio aerobio las reacciones son exotérmicas, de manera que si se dan las condiciones físicas adecuadas, se produce un aumento de la temperatura de la masa en descomposición, pudiendo llegar a superar los 70 °C en un día.

Muchos residuos orgánicos susceptibles de compostaje son portadores de patógenos de origen humano, animal o vegetal, ya sean virus o bacterias. Buen ejemplo de ello son los residuos municipales o los fangos biológicos de depuración. Otros agentes biológicos considerados perniciosos para el uso posterior del compost son los huevos o larvas de insectos y semillas de malas hierbas. Todos ellos son susceptibles de ser eliminados por inactivación a alta temperatura durante un determinado periodo de tiempo en el rango de valores del proceso de compostaje. Otro problema añadido es la presencia de metales pesados procedentes de los fangos de las áreas muy industrializadas.

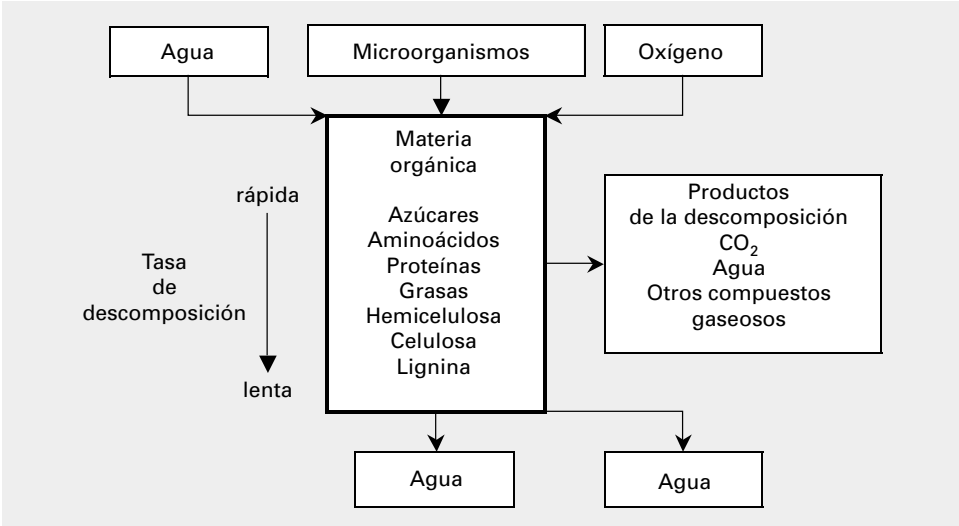


Figura 11.45. Síntesis del proceso de compostaje.

6.4.1. Formulación de un compost con RSU

Los RSU por su origen y composición contienen organismos patógenos y parásitos que pueden ocasionar enfermedades infecciosas o incluso generar toxicidad al hombre y a los animales. Durante el proceso de tratamiento, tanto de RSU como de fangos de EDAR, tiene lugar una disminución de la cantidad de organismos patógenos. Para ello tanto las autoridades ambientales de la UE como la USEPA proponen unas condiciones mínimas para la higienización del proceso.

En casi todos los países la fabricación del compost se lleva a cabo, casi en exclusiva, a partir de la fracción fermentable de los RSU separada previamente. Además junto a los RSU se hallan una serie de sustancias tóxicas como las asociadas a productos de limpieza, higiene, medicamentos, desinfectantes, insecticidas y productos fitosanitarios, etc. Muchos de estos productos son estables, poco solubles en agua y difícilmente biodegradables. El hecho de que sean, muchos de ellos, liposolubles condiciona su persistencia en la cadena trófica.

Su comportamiento en el suelo, una vez transformado en compost, depende tanto de la molécula (tamaño, solubilidad, polaridad, propiedades fisicoquímicas), como de las características del medio (luz, pH, temperatura, humedad, contenido en materia orgánica y arcilla, población microbiana, etc.).

Para llevar a cabo compostaje correcto la materia fermentabble debe ser «fresca» es decir, no tener mas de 3 o 4 días y con una humedad propia de estos materiales. Existen posibilidades reales de reciclaje, sin embargo es preciso observar algunas normas para la aplicación del compost a la agricultura, tales como:

- La presencia de metales pesados.
- Destino del cultivo (alimentación humana o animal).

Para otras aplicaciones no existen, lógicamente tantas restricciones, así destaca su aplicación en jardinería, en paisajismo, en la restauración de espacios degradados, reconstrucción de áreas afectadas por grandes obras públicas, extracción de áridos, canteras, minería, etc.

En estos ámbitos, la preparación del terreno para la posterior implantación de cubiertas vegetales, mediante siembras y/o plantaciones, que impidan o minimicen la erosión, requiere el aporte al suelo de materia orgánica y fertilizantes que pueden ser suministrados por los RSU en muchos casos. También es interesante señalar la posible derivación de RSU, una vez transformado en compost, a los planes de reforestación tanto de superficies quemadas como de tierras de cultivo abandonadas.

El valor de la aplicación de los RSU en la agricultura es el origen orgánico de baja graduación con una carga importante de nitrógeno de lenta mineralización. El valor nutriente de los RSU no debe circunscribirse al contenido de los tres más importantes: N, P y K, sino que debe valorarse la aportación de micronutrientes. Un complemento a la estructura orgánica del compost resultante consiste en la adición de estiércol:

- La aplicación de los RSU también se contempla como una vía para la incorporación de humus (si éste no se renueva, el existente se va mineralizando y el suelo pierde su valor nutritivo), cuando el estiércol disponible es reducido.
- Aunque el proceso de obtención de compost, ya sea procedente de RSU o de fangos, haya sido correcto su utilidad como substrato implicará casi siempre su mezcla con otros materiales, generalmente turba (en la UE su extracción está prohibida), cortezas silvícolas, etc., para que las propiedades sean las exigidas. El producto final suele tener entre un 20% y un 50% de compost de RSU.

En este último aspecto, la utilización de compost de RSU como sustrato, es de vital importancia la selección de los RSU para evitar la inserción de papeles, vidrios, plásticos, etc.

Cuando los residuos llegan a la planta de fabricación son pesados y más tarde pasan por las siguientes etapas:

- Tamizaje y trituración (para reventar los envoltorios y desfibrar, en lo posible, los productos fibrosos).
- Introducción en la zona de compostaje (los túneles y/o pilas pueden tener hasta 2,5 m de altura).
- Aireación-volteo (en esta operación se mezcla y se airea el material). El porcentaje recomendable mínimo de oxígeno es del 18%.
- Cribado (esta operación se realiza fuera de las pilas de volteo, en un tromel).

Es preciso controlar la humedad y temperatura del material. Si la humedad se reduce hay que añadir agua. La temperatura oscila de 50 a 75 °C. No obs-

tante la temperatura a la cual los microorganismos presentan la máxima actividad es de 30 a 35 °C. El ciclo total puede durar 8 semanas.

A partir de los RSU se puede diseñar un buen compost con la siguiente proporción:

- 1/3 de RSU seleccionado.
- 1/3 de residuos leñosos (para proporcionar porosidad)
- 1/3 de residuos de poda, restos de hortalizas, (materiales de rápida fermentación que aceleran el proceso de compostaje).

La Figura 11.47 muestra un sistema para el compostaje de pequeñas cantidades.

La fracción mezcla residual (o fracción resto) que se genera en la planta de reciclaje y compostaje de RSU de Onda (Castellón, España) está formada por un amplio conjunto de materiales no reciclables que actualmente tiene como única opción su depósito en vertedero. Este tipo de residuos deben cumplir ciertos requisitos de calidad para poder ser empleados como combustibles y ser valorizados energéticamente.

El rechazo producido en la planta de compostaje y reciclaje puede someterse a un proceso de producción de Combustible Derivado (CDRSU) que se constituye en el punto de partida para la valorización energética de la fracción no reciclable de los RSU. El CDRSU puede ser empleado en procesos industriales como combustible alternativo y, aunque su producción representa un coste adicional las ventajas frente a la utilización de RSU no tratados son significativos y pueden compensar este mayor coste. Entre las principales ventajas, frente a los RSU, se pueden destacar:

- El aumento del poder calórico debido a la homogenización del material y la eliminación de la fracción no combustible.
- Disminución de la humedad que facilita su almacenamiento y hace más eficiente su combustión.
- Homogeneidad de propiedades físicas y químicas.
- Facilidad de almacenamiento, manipulación y mantenimiento. Disminución de la necesidad de aire en exceso durante la combustión.
- Reducción de la producción de cenizas.

El proceso de fabricación del CDRSU consta de las siguientes etapas:

- Trituración: permite obtener una mezcla más homogénea y con un tamaño de partículas relativamente uniforme. Se puede emplear molinos de martillos, molinos batientes o trituradoras de cizalla según el tamaño de partícula deseado.
- Separación de partículas metálicas empleando imanes permanentes o electroimanes.
- Separación de metales no férricos por corrientes de Foucault.
- Reclasificación en tromel, recirculando todo el material que no ha alcanzado el tamaño deseado.
- Separación de inertes con la ayuda de mesas densimétricas.
- Secado hasta alcanzar un 10% de contenido de humedad. Los vapores deben depurarse por medio de ciclones y torres de lavado de gases.
- Densificación o compactación para hacer más eficiente el almacenaje y transporte. Se pueden emplear extrusoras, empacadoras o peletizadoras.

Los procesos de combustión que pueden acoger el uso de los CDRSU como combustible son las plantas para producción de calor o energía, los hornos de cemento, los hornos de soplado en la producción de asfalto, así como las operaciones de gasificación y termólisis.

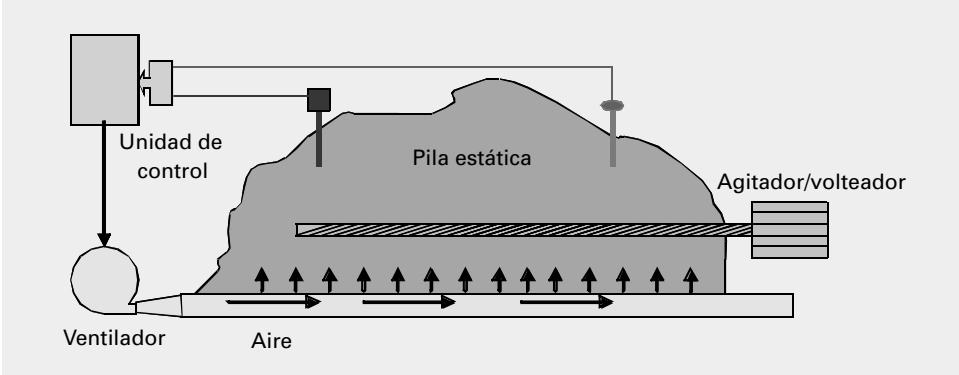


Figura 11.47. Compostadores para pequeñas cantidades de RSU.

6.4.2. Vermicompostaje

Se trata de la degradación de los residuos orgánicos por medio del cultivo de la lombriz *Eisenia foétida*, comúnmente llamada «Roja de California». Los residuos orgánicos como el estiércol del ganado y residuos de cosechas, permiten la conversión de la materia orgánica en humus y proteína con cuidados especiales.

Los cuidados de las lombrices son sencillos. Necesitan aire para vivir y mucha humedad, soportan variaciones de temperatura entre 5 y 25°C y necesitan alimento permanente de desperdicios orgánicos, estiércoles de animales, frutas en descomposición, bagazo de caña, pulpa de café, virutas de madera, etc.

Los recipientes adecuados para el cultivo de las lombrices deben de ser más anchos que hondos, con drenaje y protección contra la lluvia y sol directo.

Las cajas pueden ser de 30 · 60 · 90 cm, para cultivar aproximadamente medio kilogramo de lombrices que se alimentarán con aproximadamente 250 gramos de desperdicios orgánicos.

En las cajas se introduce una capa de material seco (pasto, hojas, papel) y después una capa de materia orgánica, finalmente encima de éstas se colocan las lombrices y se tapa con plástico negro para evitar que se reseque la lombricompostera.

Después de dos semanas, se agrega más materia orgánica y hasta seis meses después no se puede obtener abono.

6.4.3. Compost y vertederos

En muchas ciudades no existe la recogida selectiva de fracción fermentable o, en la mayoría de las grandes ciudades la fracción recogida está muy mezclada y es de mala calidad. Por otra parte las cantidades de materia fermentable recibidas en las grandes aglomeraciones urbanas obligan a procesos de compostaje parciales o en malas condiciones, todo ello comporta que la actividad microbiológica no se reduzca:

- Debido a las altas o bajas temperaturas de proceso.
- Baja humedad.
- Reducido porcentaje de oxígeno.
- Presencia de sustancias tóxicas.
- pH inapropiado, etc.

Como solución de emergencia para dar salida a este compost de mala calidad (compost gris), en algunos países se incinera y en otros se usa para la restauración de las áreas ocupadas por los vertederos. Así:

- En los Países Bajos se emplea más de 164.000 t (equivalente al 25% de los RSU) en la restauración de vertederos.
- En Canadá, la *Canadian Composting Inc*. Produce 150.000 t/año de compost gris que se emplea en la restauración de canteras, espacios degradados y vertederos.
- Cantidades semejantes, o mayores, se usan en Australia y EE UU para el mismo propósito.
- El compost procedente de Ecoparc-1 de Barcelona va directamente al vertedero.

6.4.4. Salud y seguridad en la fabricación de compost

Salud y seguridad son consideraciones propias a todas las actividades humanas, ambas tienen que ver con los empleados, la ciudadanía en general, los animales y la vegetación. En este contexto la «salud» tiene relación con el material resultante de la acción de bacterias, hongos y la propia oxidación. Mientras que la «seguridad» está mas relacionada con los equipos. La fabricación del compost entraña ciertos riesgos que han sido debatidos en muchos foros y se pueden resumir a dos estadios: la cantidad de contaminantes que puede contener la materia prima de las que se parte y la propia fabricación.

En toda la UE es obligado que las plantas de compost se hallen en el interior de naves herméticamente cerradas con ventilación forzada y tratamiento de gases. Entre los problemas generados se halla la emisión de numerosos microorganismos y hongos, entre los que debe destacarse el *Aspergillus*, un hongo que es propenso a fijarse en las vías respiratorias y provocar serios problemas de salud. También durante el proceso deben extremarse los contactos con la materia en proceso, en particular el polvo generado, ya que se generan una serie de gases tóxicos, si bien en pequeñas cantidades.

Es prudente tomar en consideración contra el riesgo que pueda entrañar:

- Infecciones por bacterias fecales y salmonela.
- Afecciones pulmonares debido a la inhalación de hongos.
- Fiebre y otros síntomas producidos por la inhalación de bacterias endotóxicas.
- Alergias y rinitis, debido a esporas.
- Respiración de polvo tóxico.
- Diarreas, leptospirosis y otras enfermedades que pueden ser graves para los humanos.

En otro orden de problemas se sitúan los riesgos derivados de un compost de mala calidad (básicamente por metales pesados) sobre las plantas destinadas al consumo humano directamente o indirectamente por medio de la dieta del ganado.

6.5. METANIZACIÓN

En una primera aproximación, puede decirse que la metanización es una alternativa de valorización de la fracción fermentable de los RSU, cuando estos están bastante contaminados.

La metanización es una tecnología que consiste en transformar una parte de la fracción fermentable de los residuos en gas metano para su posterior valorización. En función de la humedad se distingue entre:

- Metanización húmeda. Se debe añadir agua a los residuos hasta que el contenido de sólidos esté entre el 10 y el 15%. Es un proceso idéntico al usado para el tratamiento de fangos de EDAR.
- Metanización seca. El contenido de sólidos a la entrada del digestor oscila del 20 al 40%. La producción de gas es mayor por volumen de reactor.

Se considera que la ratio óptima C/N ha de ser de 20-30 y el tiempo de residencia, dependiendo de la tecnología usada, por lo general 15 días.

El principio de funcionamiento, como indica el esquema de la Figura 11.48, consiste en:

- Triaje y separación de la fracción fermentable. En principio el proceso se adapta a los denominados residuos húmedos: restos de comida, residuos de jardín, etc.
- Entrada en el tanque de hidrólisis, en el que se añade agua y existe un potente turboagitador que desintegra la materia fermentable y segrega los impropios. En esta etapa se separa un fango primario apto para compostar.
- Alimentación del residuo preparado al digestor anaerobio.
- El biogás generado en el digestor (mezcla de metano y gas carbónico), se lava, se comprime y se almacena en un gasómetro. Esta fase puede tener una gran variedad de sistemas para la aceleración de las reacciones: agitación mecánica, recirculación de los fangos, recirculación del biogás, etc.

La eficiencia de transformación de estas plantas, hoy en día en fase semiindustrial, es la siguiente:

$$1 \text{ t Residuo orgánico degradado} \rightarrow 100 \text{ Nm}^3 \text{ biogás} + 400 \text{ kg compost}$$

Hoy en día estas instalaciones forman parte de los sistemas de tratamiento de RSU de numerosas municipalidades. En la práctica presentan dos inconvenientes, ambos a consecuencia de una falta de eficiencia de la recogida selectiva:

- *Presencia de impropios.* Supera el 10% y da lugar a innumerables problemas tanto de naturaleza bioquímica como de índole mecánica (un trozo de metal puede romper la hélice del turboagitador).
- *Contenido de inhibidores.* El primero de ellos lo constituye la presencia de oxígeno. La mayor parte de los agentes que inhiben los procesos anaerobios son compuestos presentes en las propias fracciones de las fracciones fermentables. La Tabla 11.62 muestra una lista de los mismos, publicada por la USEPA, con los correspondientes umbrales de inhibición.

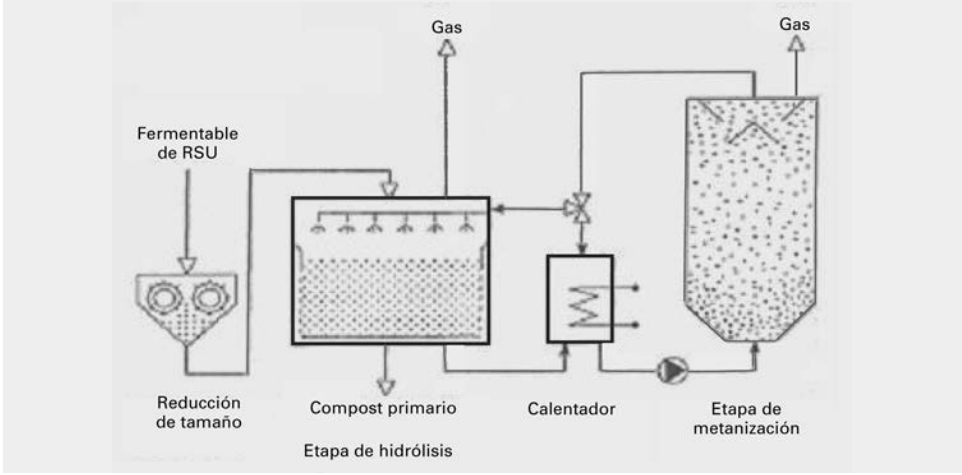


Figura 11.48. Esquema de una planta metanizadora de RSU.

Tabla 11.62. Límites para sustancias inhibidoras de reacciones anaerobias

Sustancia	Concentración de inhibición (mg(l)
Ácidos volátiles	> 2.000 (como ácido acético)
N amoniacal	1.500-3.000 (a pH > 7,6)
Sulfuros (solubles)	> 200; (> 3.000 es tóxico)
Ca	2.500-4.500; (8.000 inhibidor muy fuerte)
Mg	1.000-1.500; (3.000 inhibidor muy fuerte)
K	2.500-4.500; (12.000 inhibidor muy fuerte)
Na	3.500-5.500; (8.000 inhibidor muy fuerte)
Cu	0,5 (metal soluble)
Cd	150 milimol/kg materia seca
Fe	1.710 milimol/kg materia seca
Cr^{+6}	3
Cr^{+3}	500
Ni	2

Desde el punto de vista químico en la digestión anaerobia se desarrollan una gran cantidad de reacciones catalizadas cada una de ellas por enzimas específicos para dar compuestos intermedios distintos. En el aspecto microbiológico, el número de especies bacterianas presentes es muy elevado y las reacciones entre ellas son altamente complejas.

En líneas generales se puede decir que durante la digestión, la biomasa de partida compuesta por moléculas complejas (polisacáridos, proteínas, lípidos y lignina) se descompone en moléculas más pequeñas, proceso que se puede considerar que acontece en tres etapas clásicas, para dar como productos finales metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). En cada una de las etapas intervienen un sinfín de bacterias especializadas.

La aplicación de la digestión anaerobia al tratamiento de la fracción orgánica de residuos municipales (FORM) a escala industrial tiene apenas una vida de unos 14 años en Europa, pero el crecimiento en el número de instalaciones y capacidad de estas ha mostrado un incremento notable, siendo en estos momentos una alternativa competitiva para ciertos residuos. Para que el sistema de tratamiento de la FORM sea operativo a escala industrial, y municipal, será preciso implantar una recogida selectiva en origen de esta fracción.

De manera simplificada la reacción básica es:

$$\text{Materia orgánica} \rightarrow (\text{Digestión anaerobia}) \rightarrow CH_4 + CO_2 + H_2 + NH_3 + H_2S$$

En general, la digestión anaerobia tiene lugar en las siguientes tres etapas:

- Liquefacción o rotura de los polímeros (proteínas, grasas, carbohidratos, celulosas, etc.). En la fase de hidrólisis las proteínas se transforman en aminoácidos, los carbohidratos en azúcares, etc.
- Formación de ácidos.
- Formación de metano.

La producción de biogás depende principalmente de la caracterización del residuo y de las condiciones de trabajo del digestor. Así, a grandes líneas, puede ser de 0,20 a 1,10 m^3/kg de materia sólida, con un contenido en metano entre el 57 y el 69%, como se observa en la Tabla 11.63.

Tabla 11.63. Límites de composición del biogás

Componente	% Volumen
Metano (CH_4)	40-75
Dióxido de carbono (CO_2)	25-60
Óxido de nitrógeno (NO_2)	0-7
Oxígeno (O_2)	0-2
Hidrógeno (H_2)	0-1
Sulfuro de hidrógeno (H_{2S})	0-1

6.5.1. La producción de biogás

La producción de biogás depende principalmente de la caracterización del residuo y de las condiciones de trabajo del digestor. En el caso de los fangos de EDAR, tomando los datos de una planta tipo, se puede indicar que, el fango de entrada al digestor tiene un 2,19-3,34% de materia orgánica seca, que se reducirá a 1,37-2,06% a la salida, lo que supone aproximadamente la reducción de la materia orgánica (medida en DBO, demanda biológica de oxígeno) del 65%.

El biogás producido tiene una composición aproximada de:

- CH_4 : 70-75%;
- CO_2: 25-30%;
- H_2S: 5-25 ppm;

Hoy en día la producción de biogás puede aumentarse en gran manera a base de someter el fango, justo a la entrada del digestor, a técnicas como:

- Ultrasonidos.
- Hidrólisis térmica combinada con cavitación hidrodinámica.

Estos procesos provocan la rotura de las membranas celulares.

6.5.1.1. El lavado del biogás

En la práctica la purificación del biogás es la remoción del dióxido de carbono o el sulfuro de hidrógeno o ambos. El dióxido de carbono es eliminado para aumentar el valor como combustible del biogás. El sulfuro de hidrógeno (H_2S) se elimina para disminuir el efecto de corrosión sobre los metales que están en contacto con el biogás. En el biogás se encuentran cantidades variables de sulfuro de hidrógeno (H_2S), también denominado ácido sulfhídrico, que al reaccionar con agua se convierte en ácido sulfúrico (H_2SO_4) el cual es altamente corrosivo y puede ocasionar graves daños. Aunque en la literatura se encuentran grandes variaciones en los valores considerados mínimos permisibles de H_2S, para la utilización del biogás en motores de cogeneración se considera como mínimo permisible la cifra de 0,15% (volumen).

El método químico más simple y eficiente de eliminación del dióxido de carbono es su absorción en agua alcalina. Este sistema necesita mucha atención por cuanto el agua de cal se agota y necesita recambiarse frecuentemente, lo que trae como consecuencia su preparación frecuente sino se obtiene comercialmente. El agua de cal puede sustituirse por una solución acuosa de etanol amina la cual absorbe el dióxido de carbono (y también el sulfuro de hidrogeno), aunque este proceso es caro para hacerlo de forma rutinaria en la purificación del biogás debido al calentamiento periódico a que tiene que ser sometida esta sustancia para su regeneración.

Otra alternativa, es utilizar otra fuente residual fuertemente alcalina como medio de absorción de estos gases como son los efluentes de cultivos de microalgas. El líquido efluente del digestor es vertido directamente en un tanque de gran tamaño para producir el alga spirulina. El alga es filtrada para ser usada como alimento de cerdos o patos o bien como aditivo, y el agua residual que tiene un valor de pH de 10 o más es almacenada en un tanque. El biogás se hace atravesar en contracorriente por esta agua. El agua resultante de esta reacción, contiene carbonato de hidrogeno, es reutilizada en el cultivo de las algas.

El dióxido de carbono es bastante soluble incluso en agua neutra (878 cc/litro a 20 °C) bajo presión atmosférica, así que el lavado con agua ordinaria es quizás el método mas sencillo de eliminación de impurezas. El CO_2 es soluble en agua mientras que el metano no lo es. A alta presión, la solubilidad del CO_2 aumenta proporcionalmente permitiendo que la concentración de metano en el biogás se incremente.

Además de los métodos tradicionales de desulfuración con limaduras de hierro o ciertos tipos de óxidos conocidos como hematites parda o limonita, los cuales son ricos en sustancias ferrosas, existe un procedimiento basado en la adición de aire al 1,5% del volumen de biogás producido. Con este método se asegura una disminución del contenido de H_2S de aproximadamente 120 ppm o 0,012% en volumen de biogás.

Otro procedimiento se basa en un reactor que utiliza un sistema catalítico. El proceso básico consiste en poner en contacto una disolución de sulfato férrico con un gas que contiene H_2S en una torre de absorción. La disolución absorbe el sulfhídrico y lo oxida a azufre elemental que precipita:

$$H_2S\ (g) + Fe(SO_4)_3\ (aq) \rightarrow S\ (s) + H_2SO_4\ (aq)$$

El azufre elemental se retira del medio mediante una operación de separación y, la disolución resultante, se pasa a través de un reactor biológico donde la bacteria *Acidithiobacillus ferroxidans* cataliza la reacción que transforma el Fe(II) en Fe(III):

$$2FeSO_4\ (aq) + H_2SO_4\ (aq) + \tfrac{1}{2}\ O_2\ (g) \rightarrow \rightarrow Fe(SO_4)_3\ (aq) + H_2O$$

Con lo que el proceso global puede esquematizarse como:

$$H_2S\ (g) + \tfrac{1}{2}\ O_2\ (g) \rightarrow H_2O\ (l) + S\ (s)$$

Lo que implica la eliminación del ácido sulfhídrico y su transformación en azufre sólido que precipita. El costo de operación supone la tercera parte del realizado por métodos químicos.

6.6. CODIGESTIÓN

La codigestión ha abierto un campo de trabajo importante y prometedor para la fracción fermentable de los RSU. Hay numerosas referencias de plantas de demostración, e industriales, en las que la fracción fermentable de los RSU se codigesta con otros fangos más energéticos.

En Centroeuropa, en particular en la zona norte, se ha llegado a la conclusión de que las plantas de biometanización, en particular las destinadas al tratamiento de residuos ganaderos solo son económicamente sostenibles por encima de una capacidad de 10.000 t/año y para un líquido que contenga un 20% de materia seca.

En el caso de las deyecciones de granjas de ganado porcino, en el mejor de los casos la máxima concentración de material seco puede alcanzar el 15%, lo normal en España es que sea del 2 al 8%. Además el purín de cerdo presenta el inconveniente de su baja tasa de transformación en metano, lo que implica que este tipo de plantas solo alcanzarán la rentabilidad si se mezcla el purín con otros residuos más energéticos. En ello se ha trabajado y se han logrado buenos resultados con la denominada codigestión, esto es, la digestión de los purines como fangos de los mataderos o de otra procedencia que aseguren una gran cantidad de materia orgánica, en especial lípidos.

En el norte de Alemania se han construido plantas de tratamiento de aguas procedentes de los mataderos que son energéticamente sostenibles, es decir, el biogás producido en el digestor cubre todas las necesidades térmicas de la industria y la electricidad generada es suficiente para atender a la demanda eléctrica del matadero. En Dinamarca existen bastantes plantas donde junto a los purines (70% en peso) se añade un 30% de residuos cárnicos ricos en proteínas, estas plantas son energéticamente autónomas y además pueden exportar energía eléctrica.

El otro problema que se plantea es el uso como fertilizante del residuo resultante del digestor. Se trata de una mezcla de líquido y sólido, con composición semejante a la de entrada, de la que por centrifugación se puede separar la fracción sólida para ser usada como fertilizante natural. Existe en la UE una normativa con respecto a la higienización de esta fracción que depende, básicamente, de la caracterización y procedencia del residuo a tratar y del destino que se vaya a dar a la fracción sólida. Para los residuos ganaderos habituales, la higienización se puede conseguir con:

- 70 °C de temperatura mantenida durante 1 hora, o
- 173 °C durante 20 minutos a 3 bares de presión.

La discusión radica en establecer el umbral de higienización en reactores que difícilmente sobrepasan los 50 °C, con flora microbiana termófila, aunque el tiempo de permanencia del líquido sea de 10 o 15 días.

El otro problema, y más importante desde el punto de vista ambiental, es la fase líquida. Esta fase, obviamente mayoritaria, tiene un gran contenido de materia orgánica disuelta, inconveniente por el que se están realizando muchas pruebas para tratar en medio ácido estas aguas, neutralizar el efecto del nitrógeno y poderlas usar como agua de riego.

6.7. PASTEURIZACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA FERMENTABLE

La pasteurización es un proceso de calentamiento de un producto orgánico, hasta una temperatura que oscila entre 55 y 70 °C, para destruir las bacterias perjudiciales sin producir cambios en la composición, en el sabor o en el valor nutritivo del producto. El proceso se llama así en honor del químico francés Louis Pasteur, quien lo ideó en 1865 con el fin de inhibir la fermentación del vino y de la leche. La leche se pasteuriza al calentarla a 63°C durante 30 minutos, luego se enfría con rapidez, y se envasa a una temperatura de 10 °C.

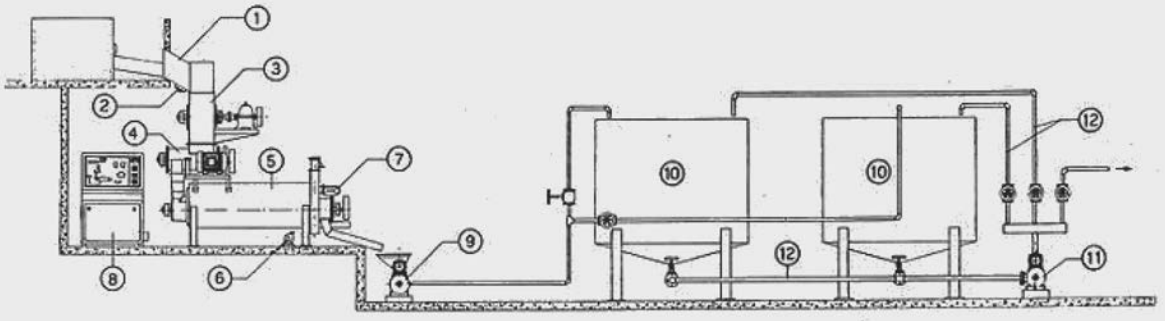
Hoy en día la mayor parte de los alimentos envasados se pasteurizan, en particular los derivados de la leche y los huevos pero también la cerveza y el vino se pasteurizan al ser calentados a unos 60 °C durante unos 20 minutos. Según un método más reciente, calentando a 70 °C durante 30 segundos y envasando en condiciones estériles, el proceso es suficiente para garantizar la higiene sanitaria.

En el campo de los residuos este sistema ha sido desarrollado para el reciclaje y tratamiento de los residuos fermentables orgánicos. En síntesis consiste en introducirlos, parcialmente triturados, en un turbo calentador y mantenerlos el tiempo preciso para inhibir el efecto pernicioso de los gérmenes patógenos presentes. Algunas bacterias son resistentes y pueden sobrevivir tras el pasteurizado, pero estas bacterias no causan enfermedades a las personas ni a los animales. Este proceso no altera el olor, el sabor, la composición ni el contenido nutricional.

El material resultante de aplicar esta tecnología a los restos fermentables, por ejemplo residuos de frutas y verduras, es suministrado a los animales. El proceso ha sido probado satisfactoriamente en Brasil para el engorde de cerdos.

El principio de funcionamiento, como esquematiza la Figura 11.49, consta de un molino que tritura el residuo hasta un tamaño que permita la alimentación al higienizador, también denominado «cocinador». El producto seco, pero ahora desprovisto de gérmenes, es hidratado de nuevo (conservando el nombre italiano de «pastone») y almacenado en tanques para su homogeneización y distribución.

La principal aplicación consiste en la valorización de residuos de naturaleza orgánica fermentable como puede ser el rechazo de frutas y verduras de los grandes centros de acopio o plantas de tratamiento de cultivos específicos como: mandioca, piña,



1. Alimentación
2. Electroimán
3. Molino triturador
4. Molino secundario de refino
5. Turbo «cooker»
6. Bomba dosificadora de agua
7. Generador de calor
8. Panel eléctico y de control
9. Bomba de trasiego del «pastone»
10. Tanques de almacenamiento del «pastone»
11. Bomba de distribución
12. Sistema de recirculación y homogeneización

Figura 11.49. Turbo «cooker» para la pasteurización.

patata, plátano, etc. El proceso permite la higienización por eliminación de los gérmenes patógenos y mantiene intacto su poder nutritivo (en la mayoría de estas especies tanto en la pulpa como en la piel hay gran cantidad de hidratos de carbono pero también proteínas y vitaminas), lo que permite sustituir o disminuir la típica alimentación a base de maíz o sorgo.

En Estados Unidos la legislación aparecida en 1993, (la norma 40 CFR Part 503) restringía la presencia de patógenos en los biosólidos procedentes de depuración de aguas urbanas y determinaba a estos efectos la categoría de biosólidos de clase A. Estos biosólidos son aquellos sin patógenos, sin olor y con características que no atraigan vectores de transmisión (insectos, etc.), es decir, están higienizados.

La digestión anaeróbia de los fangos de EDAR, aun en régimen termófilo, no asegura la total eliminación de patógenos o se hace difícil de operar, por lo que se inició la aplicación de otras tecnologías como la pasteurización. La pasteurización de los fangos de EDAR procedentes de digestores anaerobios se ha convertido, pues, en una tecnología habitual aunque los sistemas para llevarlo a cabo están actualmente desarrollándose e investigándose con numerosos proyectos piloto.

El sistema de pasteurización AGF (flotación de gas anóxico) básicamente consta de dos digestores anaerobios entre los que se sitúa la unidad de pasteurización. Mediante el gas exhausto de una turbina, idealmente alimentada con el biogás generado por la planta, o cualquier otra fuente de aire caliente (como combustión sumergida), se densifica por flotación, a la vez que se calienta, el fango del primer digestor. Se pasteuriza solamente el fango con un porcentaje de sólidos superior, que ya se encuentra caliente, y posteriormente, ya libre de patógenos, se vuelve a digerir en el segundo digestor. Esto permite una reducción de sólidos volátiles total del 70-80% y la obtención de biosólidos de clase A.

6.8. TRATAMIENTO DE LOS RESIDUOS HOMOGÉNEOS Y CONTAMINADOS

Este grupo de residuos orgánicos está formado por un conjunto de residuos de diversa procedencia pero que presentan unas características comunes:

- Se trata de residuos muy homogéneos: normalmente la cantidad de agua es muy importante y ello trae como consecuencia que el tamaño de la fracción sólida sea pequeño.
- El contenido de contaminantes, básicamente de naturaleza orgánica y biológica, es importante, por lo que precisan un tratamiento antes de su vertido.

Debido a toda una serie de factores ya expuestos, la tecnología más adecuada y común pasa por la digestión anaerobia.

La Figura 11.50 muestra, a título de resumen, el esquema básico del nivel de tratamiento recomendado para estos residuos.

6.9. EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LOS DIVERSOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE LOS RSU

Como complemento a la gama de tecnologías de tratamiento y valorización de residuos presentada en la Figura 11.50, se puede desarrollar un ejercicio

Figura 11.50. Nivel de contaminación y tecnología adecuada.

teórico de conversiones energéticas de los RSU convencionales en electricidad.

La energía solar, fotosíntesis, transforma el CO_2 y el H_2O en sustancias orgánicas (por simplicidad de cálculo se adopta la fórmula H-COH para la biomasa), con liberación de O_2, de acuerdo con la reacción.

$$CO_2 + H_2O + \text{Energía solar} \rightarrow (\text{H-COH}) + O_2$$

En el proceso inverso, la energía almacenada en la biomasa libera una cantidad de calor que depende del sistema de conversión energética:

$$(\text{H-COH}) + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O + 4{,}65 \text{ kw (Combustión)}$$

El calor (energía) indicado en la expresión anterior corresponde a un máximo teórico e ideal: como si todo el calor generado pasara a los gases de combustión y se aprovecharan íntegramente. Una vez liberada la energía, en forma de gases calientes, parte del calor se recupera en la caldera con una eficiencia, o rendimiento, del 85%.

El esquema de la Figura 11.51 muestra las posibilidades de conversión energética que pueden tener lugar en un RSU, según la forma de tratamiento.

Para llevar a cabo el ejemplo, se parte de la base de los datos de un RSU que aparecen en la Tabla 11.64.

En la primera columna de la tabla aparece el porcentaje de cada una de las fracciones de que se compone el RSU, en la columna siguiente el PCI útil de cada fracción y en la última la energía aportada por

Tabla 11.66. Energía útil disponible en un RSU estándar

CARACTERIZACIÓN DEL RSU				
	% Peso	**PCI útil**	**kcal/kg**	**kwh/kg**
Fermentable	32%	700	224	
Papel y cartón	30%	3.400	1.020	
Plásticos	18%	7.200	1.296	
Textiles y afines	4%	3.800	152	
Inertes	16%	—	—	
	100%		2.692	3,13

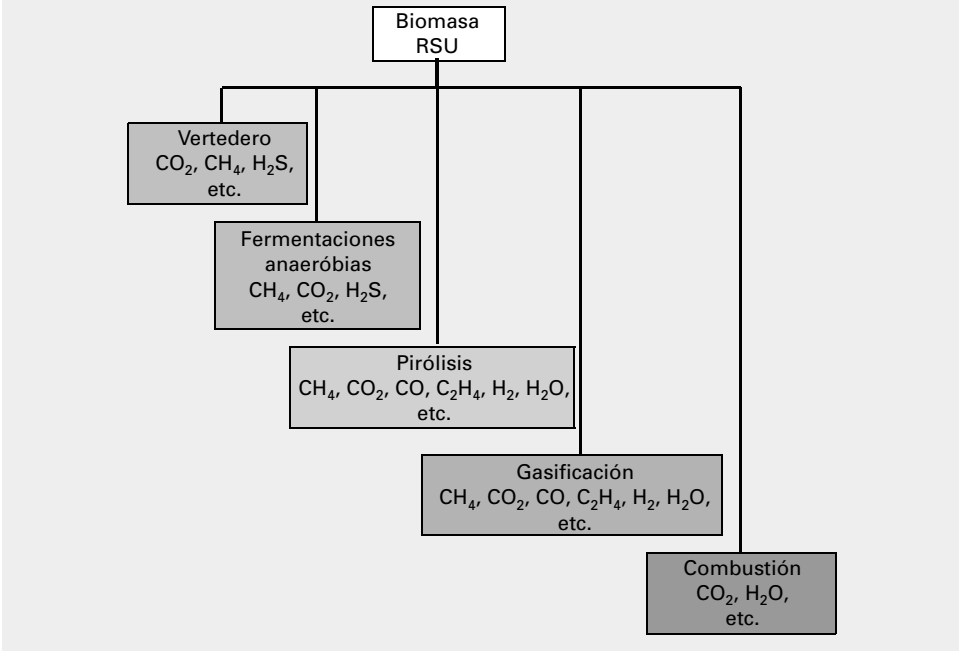


Figura 11.51. Posibilidades de conversión energética de los RSU.

cada una de ellas. A partir de estos datos se puede elaborar la Tabla 11.67 teniendo en cuenta las siguientes premisas:

- *Incineración:* Toda la fracción orgánica se oxida. El calor sensible de los gases resultantes se recupera en una caldera de vapor, donde se expande en una turbina que sigue un ciclo clásico de Rankine, con un ratio de transformación del PCI del combustible a Kw (eléctricos) en bornes del alternador del 20%.
- *Gasificación:* El residuo debe pretratarse (habitualmente se clasifica y se peletiza) lo que consume una cierta energía. El gas de síntesis se enfría en una torre, lo que representa la pérdida del calor sensible de los gases pero, sobre todo la pérdida del calor latente de los vapores presentes (hidrocarburos condensables) puesto que en fase líquida se transfieren al agua de refrigeración, lo que supone una gran pérdida desde el punto de vista energético. Por otra parte se debe emplear energía para refrigerar el agua de proceso y para accionar la EDAR. Como contrapartida, la valorización del gas de síntesis en un motor de combustión interna (ciclo Otto) presenta un elevado ratio de transformación.
- *Pirolisis convencional:* Puesto que se trata de un proceso endotérmico, se emplea una cantidad del gas generado para aportar dicho calor. Por otra parte, el coque producido, que puede representar hasta un 35% en términos de masa y un 30% en términos de energía no computa para la producción de energía eléctrica puesto que se trata de un sólido. En el presente ejercicio se parte de la base de que el gas de pirolisis se valorizará energéticamente de la misma manera que se ha realizado con el gas de síntesis. El menor rendimiento de transformación obedece al hecho de que, a pesar que el gas de pirolisis es mucho mas rico en hidrocarburos condensables que el gas de síntesis lo que, durante el enfriamiento se «perderán» (condensarán y pasarán al agua) desde el punto de vista energético ello conlleva una gran pérdida.
- *Fermentación anaerobia:* En el ejemplo presente equivaldría a la metanización. Se parte de la base de que en la etapa de hidrólisis previa, cerca de un 25% del papel y los textiles se degradarán y serán enviados al reactor de metanización. El biogás generado se valorizará en un motor de cogeneración.

Tabla 11.67. Rendimientos de las conversiones energéticas

+ Proceso	kW Disponible	Rendimiento total %	kw(e)/kg RSU
Incineración	3,13	20,0%	0,63
Gasificación	3,13	24,9%	0,78
Pirolisis	3,13	11,8%	0,37
Fermentación anaerobia	0,54	6,6%	0,21
Vertedero	0,45	5,4%	0,17

- *Vertedero:* Para calcular la energía útil disponible se parte de la base de que se aprovechará energéticamente el 80% de la fracción fermentable y cerca del 20% de los residuos de naturaleza celulósica, ya que con el tiempo se hidrolizarán y fermentarán.

Con estas acotaciones se ha confeccionado la Tabla 11.67, donde en la primera columna se indica la energía disponible en el proceso, en la columna siguiente aparece el porcentaje de conversión energética (PCI del combustible a kW (e) en bornes del alternador) y, finalmente, la última columna expone la tasa de conversión, en kW (e) a que da lugar cada unidad de RSU de acuerdo con el sistema de valorización energético utilizado.

Básicamente, de acuerdo con la Tabla 11.67, los sistemas de valorización energética pueden clasificarse en dos tipos:

- Los que siguen el ciclo Rankine, como la incineración.
- Los que valorizan el gas en un motor de cogeneración, ya sea directamente, como los dos últimos o bien previo lavado como en las versiones de pirolisis y gasificación.

A la vista de los resultados obtenidos cabe realizar las siguientes observaciones:

- A igualdad de propiedades del RSU, el rendimiento energético más elevado se obtiene en la gasificación. Sin embargo hay que advertir que esta modalidad obliga a un pretratamiento que encarece el proceso. Por otra parte, las etapas de tratamiento y lavado de gases son muy críticas.
- La pirolisis es el sistema que presenta menor rendimiento de los denominados «sistemas termoquímicos». En primer lugar por la generación de coque y, en segundo lugar debido a que la cantidad de hidrocarburos condensables es

más elevado que en el caso del gas de síntesis. Además el lavado de gases es tan crítico como el caso de la gasificación, por lo que, de cara a la conversión energética es aconsejable valorizar este gas en una cámara de oxidación.

- El caso de la metanización es, en términos energéticos, muy pobre ya que se supone que la gran mayoría de la celulosa presente y todo el plástico van a recuperarse previamente puesto que no es posible valorizarlos por este sistema.

A medida que varía la caracterización del RSU los valores obtenidos se mantienen, aproximadamente, proporcionales. Así, si la cantidad de fermentables va aumentando en detrimento de la fracción combustible (papeles y plásticos) comienzan a tener sentido, desde la óptica de la conversión energética, las valorizaciones a baja temperatura (metanizaciones), mientras que si lo que se incrementa es la fracción combustible, los sistemas termoquímicos adquieren más relevancia.

Además hay que hacer mención al hecho de que los procesos termoquímicos son instantáneos, es decir se libera la energía muy rápidamente, mientras que los procesos bioquímicos pueden tardar días y, a veces, años (vertederos).

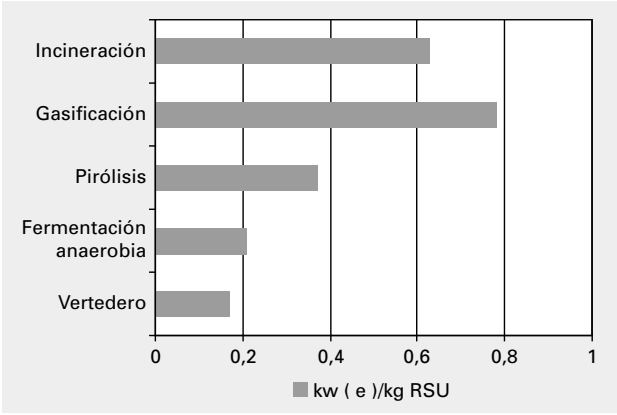


Figura 11.52. Rendimientos eléctricos de los diversos sistemas de conversión energéticos.

La Figura 11.52 muestra el resumen de lo explicado en términos de conversión de energía térmica a eléctrica.

Los resultados expresados en la Figura 11.52 son concordantes con el preámbulo llevado a cabo en este apartado, puesto que en la medida que el proceso de conversión energética se acerque más a la combustión, en este caso incineración y gasificación, la energía útil recuperada será mayor. En cualquier caso, el vertido con recuperación energética es el sistema más ineficaz desde el punto de vista energético.

7. Vertedero controlado

Un vertedero es una instalación permanente para el confinamiento de residuos estabilizados siempre que se proceda al tratamiento de las emisiones producidas. El aislamiento de los residuos se fundamenta en la interposición de diferentes barreras independientes, lo que se denomina concepto multibarrera. El diseño de las barreras de ingeniería en los vertederos y su normalización es una tarea en estudio permanente en las directivas comunitarias El desarrollo de una normativa estricta en cuanto a las condiciones de vertido persigue la disminución progresiva en el uso de este tratamiento, destinado a depositar residuos estables y no recuperables.

La Directiva 1999/31/CE sobre el vertido de residuos considera el vertido como la última opción de gestión dado su impacto negativo para el medio ambiente y sus efectos a largo plazo y fija los parámetros para su emplazamiento, explotación y clausura. También detalla el tipo de residuos que pueden ser admitidos en un vertedero y el tratamiento previo al que han de someterse.

Esto significa que los residuos actualmente en Europa, y con toda seguridad en el futuro en otras latitudes, no podrán ser simplemente depositados en un vertedero, si no que deberán ser tratados previamente (pretratamiento) para cumplir una serie de requisitos, como tener un bajo contenido en materia orgánica y humedad.

La legislación europea, en la directiva 1999/31/CE relativa al vertido establece claramente las especificaciones que debe cumplir cada tipo de vertedero en función de la tipología de residuos que vaya a albergar. Las principales cuestiones, en términos medioambientales, que se regulan son:

- Obligatoriedad de que el emplazamiento sea impermeable, evitando así la filtración de contaminantes al suelo y las aguas freáticas.

- Obligatoriedad de recoger y tratar los lixiviados.
- Obligatoriedad de desgasificar el vertedero y depurar el biogás.
- Obligatoriedad de restaurar el vertedero una vez ha finalizado su vida útil y mantener un control y seguimiento de parámetros como el gas a lo largo 30 años, periodo en que se considera que deja de tener actividad interna el vertedero (fermentación y degradación de materiales).

Los vertederos de residuos actúan como reactores anaerobios, transformando la materia orgánica fermentable en biogás, con una riqueza en metano próxima al 55%. Se calcula que por término medio por cada 1.000 kg de RSU se produce a lo largo de 10 años más de 100 m^3 de biogás. El sistema anaerobio que tiene lugar en el vertedero persigue una máxima densidad y pronta cobertura con el objetivo de impedir la entrada de aire. En contrapartida los sistemas aerobios, que son los que tienen lugar en la primera etapa de explotación del vertedero, presentan las siguientes ventajas:

- Mineralización rápida de la fracción fermentable y, en consecuencia una reducción de emisión de gases y lixiviados.
- Los lixiviados tienen una carga contaminante menor. Reducción de la DQO y la DBO, lo que supone una mayor facilidad de tratamiento. En el caso de los gases al estar más oxidados tienen un menor PCI, pero también menor explosividad y olores desagradables.

En contrapartida precisan una gran ocupación de terreno, generan una gran emisión de gases durante las etapas de fermentación aerobia que supone la atracción de muchos animales y un gran peligro de incendios. Los procesos anaerobios, los obligados por la legislación actual, presentan las siguientes ventajas:

- Mínima ocupación de espacio y de consumo energético.
- Seguridad, estabilidad y posibilidad de aprovechamiento energético.

Los inconvenientes son un largísimo tiempo de estabilización y unos lixiviados difíciles de tratar.

Diversos estudios han caracterizado la composición de los gases y lixiviados de los vertederos controlados. La USEPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos) realizó un estudio en 53 vertederos analizando el porcentaje de lugares donde se detectaron los compuestos orgánicos peligrosos más habituales en biogás y lixiviados y su rango de concentración. La síntesis se muestra en la Tabla 11.68.

Hay una correspondencia clara entre los compuestos que pueden hallarse en los efluentes del vertedero y la presencia de materiales peligrosos en la mezcla de residuos inicial. De hecho, en base al análisis de estos compuestos presentes en el biogás, no era posible distinguir los vertederos de residuos peligrosos de los vertederos de residuos urbanos.

Desde el punto de vista de la salud, los potenciales peligros de la presencia de los vertederos son:

- Accidentes en el tráfico.
- Afecciones respiratorias: polvo, humos, emisión gases (y vapores) tóxicos.
- Enfermedades: Hepatitis, leptospirosis, trastornos gástricos, etc.
- Heridas por objetos punzantes y cortantes.
- Caídas provocadas por socavones y cavernas formadas.

Tabla 11.68. Compuestos orgánicos peligrosos en los efluentes de vertederos

Compuesto químico	Rango concentración (ppm)	% De lugares donde se encontró
LIXIVIADOS		
Benceno	4-1.080	34
Cloroformo	27-31	15
Cloruro de metileno	2-220.000	60
Cloruro de vinilo	8-61	11
Dibromuro de etileno	5-5	2
Dicloroetano 1,2	1-11.000	11
Tetracloroetileno	2-620	21
Tetracloruro de carbono	6-398	4
Tricloroetano 1,1,1	1-13.00	25
Tricloroetileno	1-1.300	32
BIOGÁS		
Benceno	500-29.000	51
Cloroformo	2-171.000	27
Cloruro de metileno	60-260.000	56
Cloruro de vinilo	500-120.000	47
Dibromuro de etileno	1-2.000	7
Dicloroetano 1,2	20-34.100	18
Tetracloroetileno	10-62.000	72
Tetracloruro de carbono	5-2.100	8
Tricloroetano 1,1,1	10-21.000	49
Tricloroetileno	10-20.000	68

En Barcelona (España), la *Entitat Metropolitana del Medi Ambient* (EMMA) está actualmente restaurando zonas del vertedero del Garraf que comenzó a operar en 1974 sin ningún tipo de control en el vertido de las basuras que llegaban en los primeros años de operación.

En los últimos 10 años de gestión por parte de EMMA las condiciones del vertedero han cambiado radicalmente, los lixiviados se tratan, desde el año 2001, y se aprovecha el biogás para generar energía eléctrica. El año 2000 se cerró un primer espacio de 16 hectáreas y se destinaron 14,5 millones de euros (aportados por varias administraciones y fondos europeos) para convertirlo en un parque agrícola. Se construyeron 11 terrazas que reproducen bancales agrícolas, se plantaron especies forestales autóctonas con poca demanda de agua y leguminosas que a través de la fijación de nitrógeno atmosférico ayudan a mejorar la calidad del suelo. Entre las terrazas y las basuras del subsuelo se hizo una impermeabilización total con hasta seis capas de distintos materiales (entre ellos un millón de metros cúbicos de tierra).

El vertedero en el macizo del Garraf es el mayor de España y la planificación de su cierre en el año 2006 implicaba que tendría un balance final de 25 millones de toneladas de residuos acumulados desde 1974.

7.1. DEFINICIONES Y PRINCIPALES EFLUENTES DE LOS VERTEDEROS

La materia fermentable de los residuos, en particular los RSU, depositados en los vertederos en un ambiente anaeróbio genera biogás. Se calcula que un 30% del biogás, de este origen, producido en la UE es tratado. De lo contrario, los potenciales impactos producidos son:

- Incendios y explosiones, ya que el metano al acceder al exterior en determinadas concentraciones con el oxígeno forma mezclas explosivas.
- Genera malos olores además de contener numerosos compuestos tóxicos.
- Daños a la vegetación. Todo ello sin tener en cuenta el impacto producido por la gran cantidad de camiones que transportan los RSU.
- Efectos climáticos. El biogás esta formado, aproximadamente por un 50% de metano, gas de potente efecto invernadero (la molécula de metano capta 21 veces más la radiación infrarroja solar que el CO_2).

No menos importante es el efecto producido por los lixiviados, si bien más fácilmente conducible a una balsa de concentración para después ser tratado en una planta especifica.

7.1.1. Definiciones de términos según RD 1481/2001

El Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, es la trascripción al régimen jurídico español de la Directiva 1999/31/CE, del Consejo, de 26 de abril, relativa al vertido de residuos y establece un régimen concreto para la eliminación de los residuos mediante su depósito en vertederos. En su Artículo 2, define, a los efectos del presente Real Decreto, que se entenderá por:

a) «Residuos no peligrosos»: los residuos que no están incluidos en la definición del artículo 3, párrafo c), de la Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos.
b) «Residuos inertes»: aquellos residuos no peligrosos que no experimentan transformaciones físicas, químicas o biológicas significativas. Los residuos inertes no son solubles ni combustibles, ni reaccionan física ni químicamente ni de ninguna otra manera, ni son biodegradables, ni afectan negativamente a otras materias con las cuales entran en contacto de forma que puedan dar lugar a contaminación del medio ambiente o perjudicar a la salud humana. La lixiviabilidad total, el contenido de contaminantes de los residuos y la ecotoxicidad del lixiviado deberán ser insignificantes, y en particular no deberán suponer un riesgo para la calidad de las aguas superficiales y/o subterráneas.
c) «Residuos biodegradables»: todos los residuos que, en condiciones de vertido, pueden descomponerse de forma aerobia o anaerobia, tales como residuos de alimentos y de jardín, el papel y el cartón.
d) «Residuos líquidos»: los residuos en forma líquida, incluidas las aguas residuales pero excluidos los fangos.
e) «Tratamiento previo»: los procesos físicos, térmicos, químicos o biológicos, incluida la clasificación, que cambian las características de los residuos para reducir su volumen o su peligrosidad, facilitar su manipulación o incrementar su valorización.

f) «Autoridades competentes»: las designadas por las Comunidades Autónomas en cuyo ámbito territorial se ubique el vertedero.
g) «Solicitante»: la persona física o jurídica que solicita una autorización para establecer un vertedero con arreglo al presente Real Decreto.
h) «Entidad explotadora»: la persona física o jurídica responsable de la gestión de un vertedero, según la legislación española. Dicha persona puede cambiar de la fase de preparación a la de mantenimiento posterior al cierre.
i) «Poseedor»: el productor de los residuos o la persona física o jurídica que los tenga en su poder.
j) «Almacenamiento»: el depósito, temporal y previo a la valorización o eliminación, de residuos distintos de los peligrosos por tiempo inferior a un año cuando su destino final sea la eliminación o a dos años cuando su destino final sea la valorización, así como el depósito temporal de residuos peligrosos durante menos de seis meses.
k) No se incluye en este concepto el depósito de residuos en las instalaciones de producción con los mismos fines y por periodos de tiempo inferiores a los señalados en el párrafo anterior.
l) «Vertedero»: instalación de eliminación de residuos mediante su depósito subterráneo o en la superficie, por periodos de tiempo superiores a los recogidos en el párrafo j) anterior.
m) Se incluyen en este concepto las instalaciones internas de eliminación de residuos, es decir, los vertederos en que un productor elimina sus residuos en el lugar donde se producen. No se incluyen las instalaciones en las cuales se descargan los residuos para su preparación con vistas a su transporte posterior a otro lugar para su valorización, tratamiento o eliminación.
n) «Depósito subterráneo»: una instalación para la eliminación de residuos mediante almacenamiento permanente, ubicada en una cavidad subterránea de origen natural o artificial.
o) «Lixiviado»: cualquier líquido que percole a través de los residuos depositados y que rezume desde o esté contenido en un vertedero.
p) «Gases de vertedero»: todos los gases que se generen a partir de los residuos vertidos.
q) «Eluato»: la solución obtenida por medio de una prueba de lixiviación en laboratorio.
r) «Población aislada»: aquella en la que concurren las dos circunstancias siguientes:
   - 1.ª Tener, como máximo, 500 habitantes de derecho por municipio o población y una densidad de cinco habitantes por kilómetro cuadrado.
   - 2.ª No tener una aglomeración urbana con una densidad mayor o igual de 250 habitantes por kilómetro cuadrado a una distancia menor de 50 kilómetros, o tener una comunicación difícil por carretera hasta estas aglomeraciones más próximas debido a condiciones meteorológicas desfavorables durante una parte importante del año.

7.1.2. Los impactos ambientales de los vertederos

Como muestra la Figura 11.53 los impactos producidos por un vertedero proceden de tres ámbitos de actividades:

- Depósito de los residuos, propiamente dicho.
- Actividades propias del vertedero.
- Etapa de cubrimiento y restauración.

La Directiva 1999/31/CE sobre vertido obliga, además de tratar el biogás y los lixiviados durante un periodo de 30 años en la postclausura, donde al margen de ir tratando el biogás y los lixiviados es imprescindible mantener las instalaciones durante este tiempo. No obstante, las últimas discusiones tienden a aumentar este periodo hasta los 50 años. En cualquier caso, la petición de aumento de tiempo no presagia nada bueno.

7.1.3. La biodegradabilidad

El principal problema ambiental de los RSU es la materia fermentable que debe degradarse. Se acepta que ello es una relación DQO/DBO_5, de acuerdo con los siguientes límites:

No biodegradable $4 < DQO/DBO_5 < 2$ biodegradable.

La problemática relativa a la falta de biodegradabilidad que acontece en los vertederos proviene de:

- Presencia de sustancias orgánicas degradables tóxicas (en grandes concentraciones) que inhiben la actividad.
- Metales y sales inhibidoras.

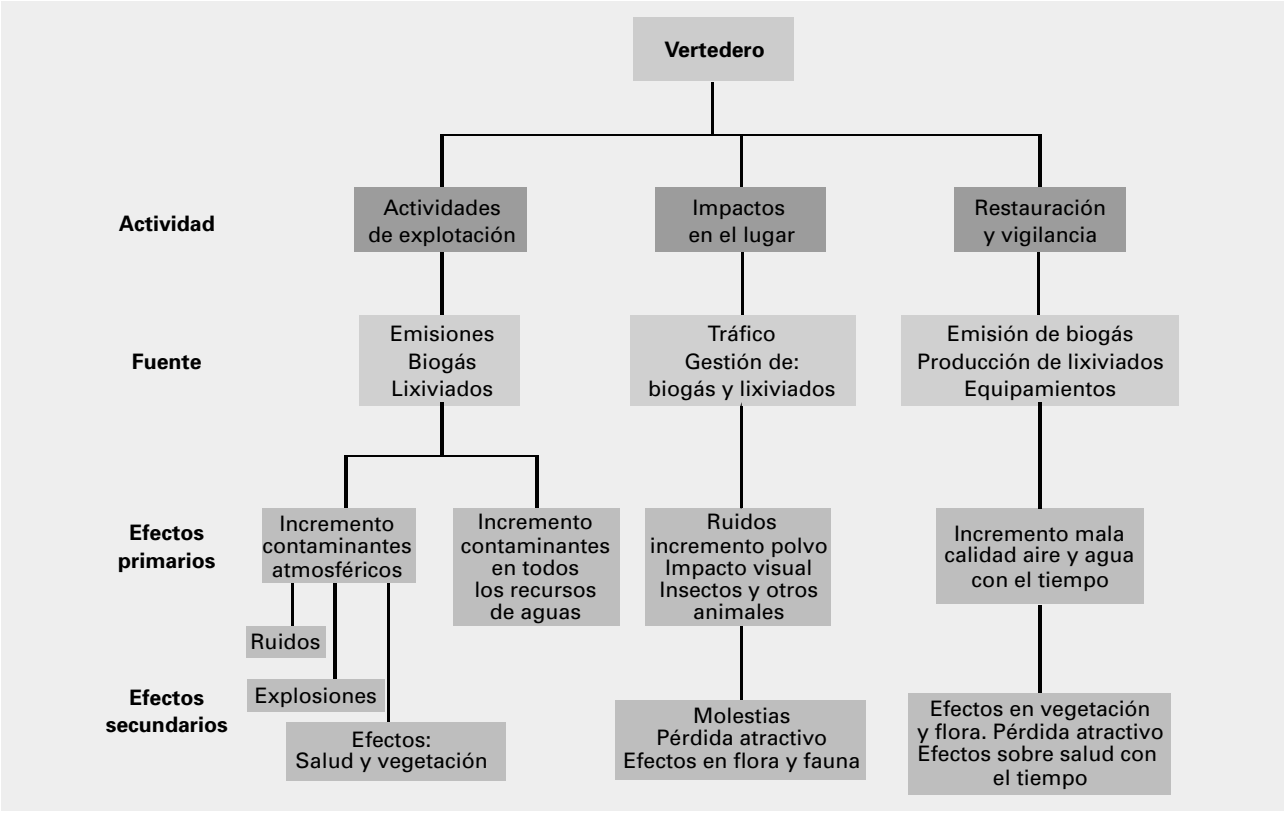


Figura 11.53. Fuentes de impacto ambiental de un vertedero.

- Sustancias no biodegradables orgánicas (aromáticos clorados o pesticidas).
- Sustancias recalcitrantes que no interfieren en el proceso biológico, pero pasan al lixiviado (algunos colorantes y pesticidas).
- Por lo general el problema más importante es consecuencia de la concentración.

En relación a la biodegradabilidad hay que tener en cuenta que si en el lugar existe mucha evaporación (problemas típicos de zonas semidesérticos) la degradabilidad disminuye y se genera un proceso de «momificación». También en relación con el régimen pluviométrico, la caracterización del lixiviado varía. Barcelona tiene un régimen de lluvias alrededor de 600 l/años, la zona de París es algo superior (700 l/años), la diferencia estriba que en España la lluvia cae en pocos días y la consecuencia es que los lixiviados son muy diferentes. Así por ejemplo:

- Norte de España (llueve bastante y a lo largo del año): DQO del orden de 4.000 mg/l.
- Sur de España (llueve poco y concentrado en pocos días al año): DQO entre 25.000 y 100.000 mg/l.

7.2. LOS LIXIVIADOS

Todos los vertederos donde los residuos son depositados con un alto contenido en materia orgánica, tienen una producción de aguas residuales, llamados lixiviados. Los lixiviados, provenientes de vertederos, tienen normalmente una contaminación orgánica muy alta. El efecto de un drenaje o vertido de estos lixiviados en un canal o río, será la destrucción de toda la flora y fauna en el agua y sus alrededores.

Valores típicos de carga orgánica observados en vertederos son:

- DQO 1.000-15.000 mg/l.
- DBO 100-3000 mg/l.
- Nkj. 500-2000 mg/l.

7.2.1. Recogida de lixiviados

Los lixiviados más concentrados siempre deben ser separados de los menos concentrados. Eso se puede conseguir con sistemas de tuberías de recogida independientes, alrededor del vertedero. Además y durante la fase operativa del vertedero, las celdas en las cuales se vierten los residuos deben ser las más pe-

queñas posibles y separadas entre sí para evitar una mezcla de agua de lluvia y de los lixiviados.

Los lixiviados son recogidos en un depósito de regulación y posteriormente llevados a una planta de tratamiento. Para el tratamiento de los lixiviados se debería utilizar dos tipos de sistemas en dos etapas. En su primera fase, el vertedero produce lixiviados con un alto contenido en DQO/DBO. Para esta fase el mejor tratamiento sería un sistema anaerobio. Una vez en pleno funcionamiento (10 años) el contenido en DQO/DBO bajará muy rápidamente y el mejor sistema sería un aerobio.

La Tabla 11.68 muestra (referencia USEPA), la frecuencia en la que aparecen los compuestos orgánicos peligrosos más habituales en los lixiviados de los vertederos.

7.2.3. Evolución del lixiviado

La cantidad y caracterización de los lixiviados va cambiando según el tipo de residuo, la humedad y la biodegradabilidad. Una cifra normal es de 150 l/kg residuo y año (Mezcla RSU con 20% RI y 10% fangos. Pluviometría 570 l/m^2. Cubrición diaria).

La Figura 11.54 muestra la evolución de los componentes del lixiviado en un vertedero de clase II.

7.2.4. Composición del lixiviado

El agua presente en los residuos y la externa, básicamente la de lluvia, actúa sobre la fracción fermentable y los compuestos presentes, disolviendo muchos de ellos y provocando la hidrólisis de otros. El conjunto de todo ello es lo que se denomina lixiviado.

Tabla 11.69. Composición típica de un lixiviado

Valores en mg/l			
Compuesto	Vertedero < 2 años		Mas de 10 años
	Rango	Normal	Normal
DBO_5	2.000-30.000	10.000	100-200
COT (carbón orgánico total)	1.500-20.000	6.000	80-160
DQO	3.000-60.000	18.000	100-500
Sólidos en suspensión	200-2.000	500	100-400
Nitrógeno orgánico	10-800	200	80 120
Nitrógeno amoniacal	10-800	200	20-40
Nitratos	5-40	25	5-10
Fósforo total	5-100	30	5-10
Orto fósforo	4-80	20	4-8
Alcalinidad, como $CaCO_3$	1.000-10.000	3.000	200-1.000
pH	4,5-7,5	6,0	6,6-7,5
Total dureza, como $CaCO_3$	300-10.000	3.500	200-500
Calcio	200-3.000	1.000	100-400
Magnesio	50-1.500	250	50-200
Potasio	200-1.000	300	50-400
Sodio	200-2.500	500	100-200
Cloruros	200-3.000	500	100-400
Sulfatos	50-1.000	300	20-50
Hierro total	50-1.200	60	20-200

La Tabla 11.69 aporta una composición típica de un lixiviado procedente de un vertedero de clase II.

La Tabla 11.69 pone de manifiesto las grandes oscilaciones que se detectan en la caracterización de los lixiviados procedentes de los vertederos jóvenes.

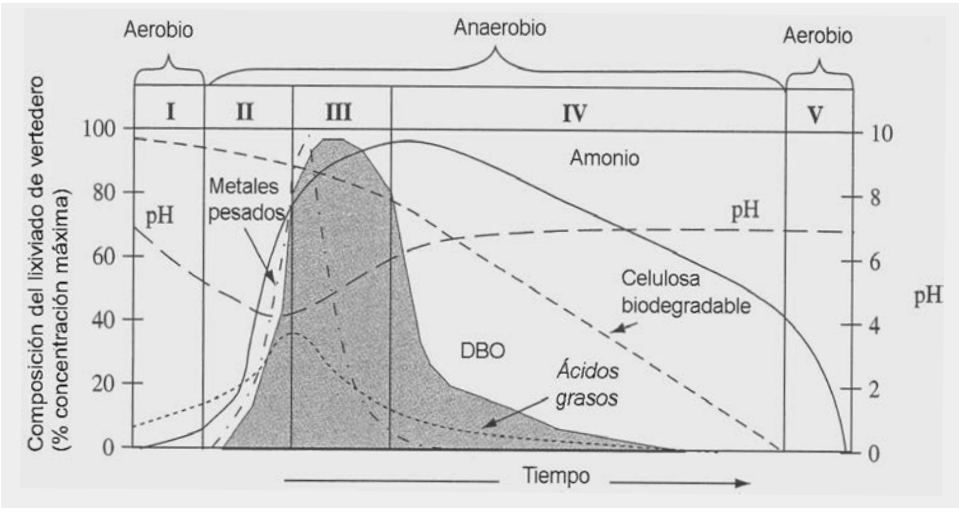


Figura 11.54. Evolución componentes de un lixiviado.

7.3. EL BIOGÁS

La definición de biogás, según el Real Decreto 436/2004 de España, consiste en un combustible gaseoso producido durante la digestión anaerobia de materia orgánica generada en las actividades de los sectores residencial, industrial y servicios. El biogás se puede producir en plantas de tratamiento (digestores) o en vertederos.

La Figura 11.55 muestra las características de un depósito controlado que permite la generación de biogás en un vertedero.

El gas de vertedero es un combustible muy abundante debido a la práctica común y exclusiva en muchos países de tratar la materia fermentable por el sistema de vertido. El problema ambiental que ello genera es de tal calibre que la UE ha desarrollado una normativa por la que obliga a tratar dicho gas. El caso es que si el vertedero está lejos de los puntos de consumo, como suele ser habitual, no hay otra manera de valorizarlo que oxidarlo en una antorcha, lo que es una lástima, ya que no se le saca ningún provecho. Por ello en los últimos tiempos se han puesto en marcha muchas iniciativas para depurar el gas *in situ* y extraer otros componentes valorizables. Por ejemplo, se ha trabajado en la depuración del gas de vertedero para obtener hidrógeno.

Las diferentes reacciones anaerobias que tienen lugar en el seno del vertedero con el concurso del agua, generan el biogás conocido como gas de vertedero. Este gas se halla casi exento de oxígeno ya que se consumió en las diversas reacciones. Sin embargo, en la composición siempre aparece un cierto porcentaje que es debido a la infiltración de aire en la etapa de extracción del biogás.

La hidrólisis es la etapa crítica que controla la degradación de los residuos y la generación de metano. Al margen de la acción bacteriana sobre la

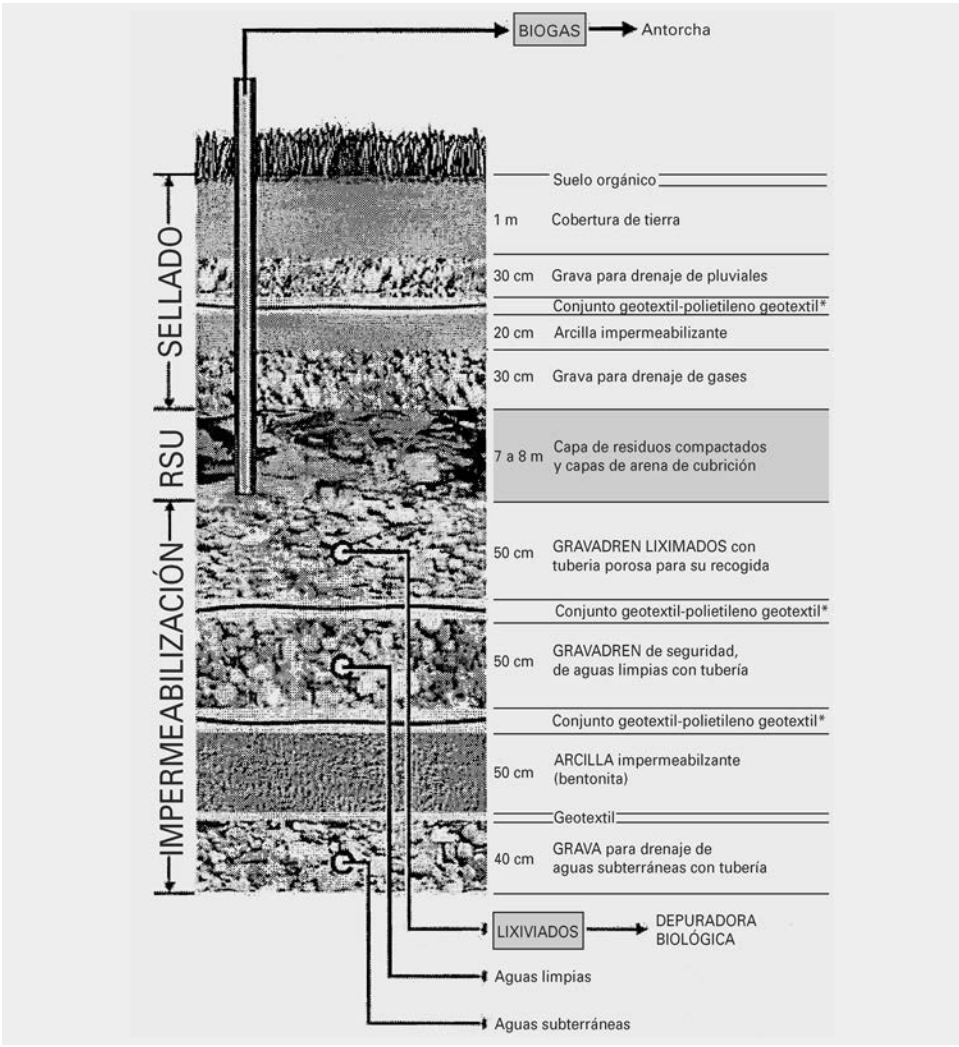


Figura 11.55. Estructura de un vertedero para la recogida del biogás.

fracción fermentable, la más común en los vertederos mixtos, la presencia de sulfatos (residuos de construcción y de neutralización de gases ácidos, fangos de EDAR, etc.) hacen entrar en acción a las bacterias sulfatoreductoras, siempre anaerobias que producen H_2S. Uno de los problemas que genera el uso de biogás en motores es la presencia de los siloxanos debido a los sulfatos presentes en los vertederos. Si estos compuestos no se eliminan pueden destruir las camisas de los motores en pocos días.

La generación del biogás se lleva a cabo en las cuatro típicas etapas de producción de un gas de origen anaerobio. La duración de cada una de las fases depende de múltiples factores. Las cuatro etapas típicas de producción de gas son:

- *Hidrólisis:* los compuestos orgánicos complejos (material particulado) son transformados en material disuelto más simple, por medio de enzimas producidas por bacterias fermentativas.
- *Acidogénesis:* los productos solubles son convertidos en ácidos grasos volátiles, CO_2, H_2, H_2S, etc., por la acción de las bacterias fermentativas acidogénicas.
- *Acetogénesis:* los productos generados en la etapa anterior son transformados en sustrato para las bacterias metanogénicas.
- *Metanogénesis:* finalmente se produce metano a partir de acetato (bacterias metanogénicas acetoclásticas) y de H_2S y CO_2 (bacterias metanogénicas hidrogenotróficas).

Como muestra la Figura 11.56, la evolución de producción de biogás suele durar unos 15 años. En la fase IV la generación de biogás es cada vez menor (los residuos están cada vez más mineralizados) y comienza a haber intrusión de aire por la parte superior y el oxígeno puede oxidar el metano y provocar explosiones.

Obviamente el PCI varía constantemente durante todo este periodo. Esto equivale a decir que hay que tener especial cuidado en el manejo del gas, en particular por la aparición de H_2S ya que daña las camisas de los motores de cogeneración.

La producción de biogás es máxima en la fase de madurez del vertedero. Los principales impactos del gas de vertedero son:

- Afecta a la salud de las personas (gases venenosos y explosiones).
- Influye en la vegetación local.
- Tiene un gran impacto (efecto invernadero) a escala global.

Numerosos estudios han demostrado que las emisiones de biogás no terminan con la clausura, y con ello los efectos perniciosos derivados de los compuestos tóxicos contenidos.

7.3.1. Composición del biogás

Poco después de depositar los residuos en el vertedero estos quedan sujetos a condiciones anóxicas. Esto es el resultado de la baja difusión del oxígeno hacia los residuos en relación al consumo de los mi-

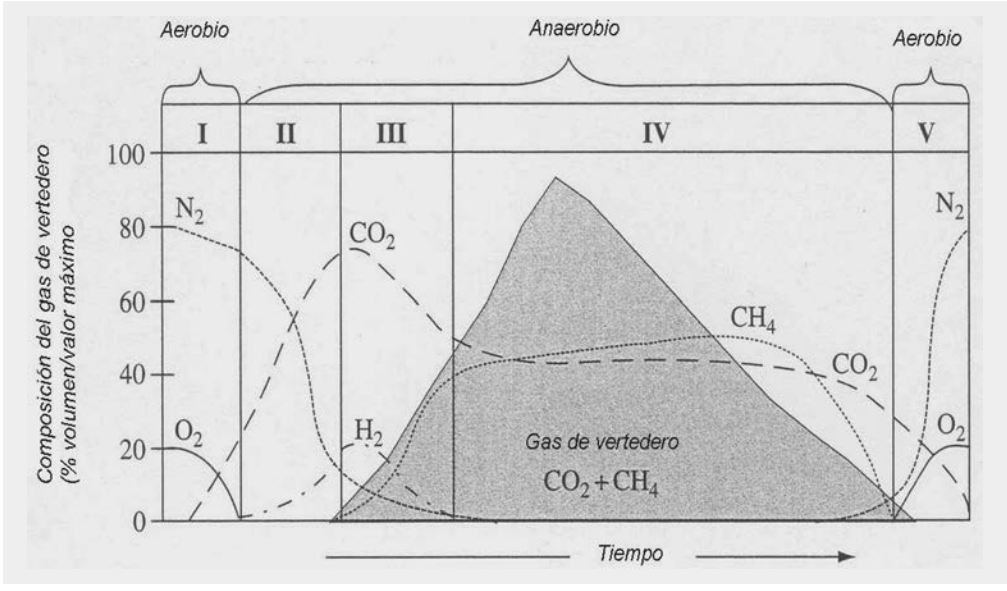


Figura 11.56. Evolución componentes de un gas de vertedero.

croorganismos que usan la materia orgánica de los mismos como fuente de energía y de carbono. La velocidad de estos procesos dependerá de la cantidad de materia orgánica, la composición del residuo y el grado de cubrición.

Las condiciones anóxicas llevan al desarrollo de una población anaerobia de fermentación de microorganismos, lo que en estrecha interacción hidroliza los polímeros orgánicos fermentando la materia hidrolizada en productos que forman los sustratos de los organismos responsables de la formación de metano. Sin compactación, hay más oxígeno disponible, conduce a una mayor degradación del residuo.

La cantidad de agua, humedad, es un factor de primera importancia pero su presencia tanto puede estimular como reducir la generación de metano en los residuos secos.

La Tabla 11.70 proporciona valores sobre cantidad de biogás producido en diversos vertederos de clase II.

Tabla 11.70. Estimación de emisiones de metano en vertederos

Lugar	Área (ha)	Cantidad RSU (t)	Emisiones CH_4 (g $CH_4/m^2 \cdot h$)
Moscú (Rusia)	60	$24 \cdot 10^6$	1,9
Tokio (Japón)	200	$31 \cdot 10^6$	0,60
Oak Ridge (EE UU)	7		0,44
Nashua (EE UU)	24	$2 \cdot 10^6$	2,6
Diversos (Países Bajos)	1,7-30	$0{,}17\text{-}2{,}3 \cdot 10^6$	5,1
Hagby (Suecia)	0,4	10^4	0,9
Nauerma (Países Bajos)	60	$5{,}4 \cdot 10^6$	0,4
Falköping (Suecia)	3	$3 \cdot 10^2$	1,3

Las diferencias observadas en la tabla se deben principalmente a la heterogeneidad espacial en la cobertura diaria del vertedero. Las bacterias que oxidan el metano no son activas a temperaturas cercanas, o por debajo, de 0 °C. Por tanto, el metano fluye sin problemas a través de la capa de cobertura a bajas temperaturas. En consecuencia, durante el invierno y en climas fríos, no importa la calidad del material de cobertura.

En el DVD adjunto, en el punto 15, se muestran sistemas de extracción de biogás en vertedero, así como antorchas para su destrucción.

7.3.2. Los siloxanos

Los problemas ocasionados por estos compuestos se han puesto de relieve a medida que se ha pretendido usar el biogás como fuente alternativa de energía, en particular en motores de cogeneración. En este sentido los principales problemas son el sulfuro de hidrógeno y los siloxanos.

La Tabla 11.71 muestra los tipos de siloxanos más frecuentes en el biogás.

Tabla 11.71. Siloxanos más frecuentes en el biogás

Compuesto	Denominación	Fórmula	PM
Hexametilciclotrsiloxano	D3	$C_6H_{18}O_3Si_3$	222
Octametilciclotetrasiloxano	D4	$C_8H_{24}O_4Si_4$	297
Decametilciclopentaxiloxano	D5	$C_{10}H_{30}O_5Si_5$	371
Decametilciclohexaxiloxano	D6	$C_{12}H_{36}O_6Si_6$	445

Durante años no se encontraba explicación lógica a la masiva presencia de compuestos de sílice y que causaban grandes desperfectos en los motores. Los análisis efectuados en los biogases han detectado la presencia de compuestos de sílice vaporizados. Solo son identificados con técnicas especiales de cromatografía de gases.

La Tabla 11.72 muestra la cantidad de siloxanos habituales en el biogás procedente de la digestión anaerobia de fangos de EDAR (en este caso la mayor variedad es la D5 y la fuente de aportación son los cosméticos).

Tabla 11.72. Concentración de siloxanos en el biogás

País	mg siloxanos/m^3 biogás
Alemania	60-100
Bélgica	20-40
Canadá	50-70
Estados Unidos	10-140
Países Bajos	50-80
Reino Unido	40-50
Suiza	10-35

Los análisis realizados en el biogás procedente de los vertederos indican que la presencia de siloxanos es todavía mayor que en el caso del biogás procedente de las aguas residuales, en particular por el uso generalizado de las siliconas. Como que es frecuente dar valores de contaminantes en gases en forma de ppm (partes por millón) teniendo en cuenta el

elevado peso molecular de estos compuestos, una cantidad de 60 mg/m^3 de D5 equivale a 3,5 ppm, cantidades muy inferiores a los de H_2S y éste puede ser un motivo por el que no se le prestaba la atención debida, máxime teniendo en cuenta que los caudales volumétricos de biogás en vertederos oscilan de 1.000 a 3.000 m^3/h. Sin embargo unos simples cálculos indican que, aunque una parte del siloxano se convierta en sílice, al cabo de pocos meses de operación la cantidad de sílice cristalizada es suficiente para destruir los cilindros del motor (las turbinas también se ven afectadas por estos compuestos).

Debido a que, en la actualidad, los siloxanos son el primer problema para la conversión energética del biogás, los fabricantes de motores han puesto un límite en 2-5 mg/m^3 de siloxanos. Cifra muy inferior a cualquier valor de los especificados en la tabla, de ahí la necesidad de depurar y eliminar estos compuestos.

La depuración por medio de *scrubbers* no es del todo satisfactoria. El método de adsorción por carbón activo es eficaz pero se debe regenerar el carbón para que el sistema sea rentable. Por lo general el biogás contiene una cantidad de humedad muy alta que debe eliminarse para ser usado como combustible. Se ha demostrado que el enfriamiento del gas para proceder a la condensación, también hace condensar los siloxanos. El descubrimiento resultó sorprendente ya que estos compuestos no son solubles en agua. Además cuanto más baja sea la temperatura, mayor efectividad del sistema. Así a –25 °C se eliminan casi todos los siloxanos.

7.3.3. Acondicionamiento del biogás

Las técnicas de depuración del biogás de vertedero son semejantes a las descritas en el caso del gas procedente del digestor anaerobio. En la práctica la purificación del biogás consiste en la remoción del dióxido de carbono o el sulfuro de hidrógeno. El CO_2 es eliminado para aumentar el valor como combustible del biogás. El H_2S se elimina para disminuir el efecto de corrosión sobre los metales que están en contacto con el biogás. Cuando el H_2S reacciona con agua se convierte en ácido sulfúrico (H_2SO_4), un compuesto altamente corrosivo que puede ocasionar graves daños. Aunque en la literatura se encuentran grandes variaciones en los valores considerados como mínimos permisibles de H_2S, para la utilización del biogás en motores se considera como valor máximo un 0,15% en volumen.

El método químico más simple y eficiente de eliminación del CO_2 es su absorción en agua de cal. Otra alternativa es utilizar una fuente residual fuertemente alcalina como medio de absorción de estos gases, como pueden ser los efluentes de cultivos de microalgas. El líquido efluente del digestor es vertido directamente en un tanque de gran tamaño para producir el alga *spirulina*. El alga es filtrada para ser usada como alimento de cerdos o patos, o bien como aditivo; y el agua residual, que tiene un pH igual o superior a 10, es almacenada en un tanque cilíndrico. El biogás se hace atravesar en contracorriente por ésta agua. El agua que queda como resultado de esta reacción contiene ácido carbónico que puede reutilizarse en el cultivo de algas.

El dióxido de carbono es bastante soluble incluso en agua neutra (878 cm^3/l a 20 °C) bajo presión atmosférica, así que el lavado con agua ordinaria es quizás el método más sencillo de eliminación de impurezas. El CO_2 es soluble en agua mientras que el metano no lo es. A alta presión, la solubilidad del CO_2 aumenta proporcionalmente permitiendo que la concentración de metano en el biogás se incremente.

Además de los métodos tradicionales de desulfuración con limaduras de hierro o con ciertos tipos de tierras conocidas, como hematites parda o limonita, las cuales son ricas en sustancias ferrosas, existe un procedimiento basado en la adición de aire al 1,5% del volumen de biogás producido. Con este método se asegura una disminución del contenido de H_2S de aproximadamente 120 ppm o 0,012% en volumen de biogás. Otro procedimiento es por medio del funcionamiento de un reactor que utiliza un sistema catalítico. El proceso básico consiste en poner en contacto una disolución de sulfato férrico con un gas que contiene H_2S en una torre de absorción. La disolución absorbe el ácido sulfhídrico y lo oxida a azufre elemental que precipita:

$$2H_2S + Fe(SO_4)_3 \rightarrow 2S_{(s)} + 2H_2SO_4 + FeSO_4$$

El azufre elemental se retira del medio mediante una operación de separación y, la disolución resultante se pasa a través de un reactor biológico donde la bacteria *Acidithiobacillus ferroxidans* cataliza la reacción que transforma el Fe(II) en Fe(III). Todo ello asegura la eliminación del ácido sulfhídrico y su transformación en azufre sólido en forma de precipitado. El coste de la operación supone la tercera parte del realizado por métodos químicos.

La conversión del biogás en pseudogás natural es una aplicación en la cual el gas debe cumplir con

las especificaciones normalmente exigidas para el gas natural. Los sistemas pueden ir provistos de membranas o de carbón activo. El objetivo de este sistema es la eliminación de CO_2, H_2S, cloro y flúor.

Recientemente ha aparecido un sistema denominado «*Lean Caloric Gas-Utilization (LCG-U)*» que se basa en la separación de gases con membranas derivada de la tecnología de membranas para el tratamiento de aguas. Para ello se usan membranas de disolución/difusión sin poros de alta selectividad, compuestas por una capa activa y otra capa portadora de material polímero, en las que la velocidad de difusión o bien la velocidad de transporte de las moléculas a través de la membrana es diferente para cada gas. Esto posibilita una separación entre diferentes gases y así obtener una mayor o menor concentración de los gases deseados.

7.4. APORTACIÓN DEL BIOGÁS AL EFECTO INVERNADERO

Es bien sabido que el depósito de material orgánico, en particular el fermentable en el vertedero produce una importante cantidad de biogás. La Tabla 11.73 propone un ejercicio teórico, a partir de una ciudad con un millón de habitantes en cuyo vertedero no se pretrata el RSU, para calibrar el impacto que puede producir un vertedero de RSU cuando no se trata el biogás.

Tabla 11.73. Cantidad de metano producido en un vertedero

GENERACIÓN DE RSU	
Habitantes	1.000.000
Producción untiraria RSU	1,5 kg/día
Producción anual	547,5 kg/año
Producción ciudad	547.500 t/año
Cantidad de fermentable	45%
Total fermentable	246.375 t/año
Material seca en el fermentable	30%
Total fermentable (MS)	73.913 t(MS)/año
PRODUCCIÓN DE BIOGÁS	
Cantidad unitaria de biogás	40 m^3 biogás/t RSU
Cantidad anual de biogás	21.900.000 m^3 biogás/año
Cantidad anual de CH_4	10.950.000 m^3 CH_4/año
Cantidad anual de CH_4	7. 821.429 kg CH_4/año
Generación unitaria de CH_4	14,3 kg CH_4/t RSU

Para comprender el problema la Tabla 11.74 pone de relieve el impacto real que produce el biogás. La Tabla 11.74 usa los equivalentes que preconiza el Panel Internacional de Cambio Climático.

Tabla 11.74. Impacto del biogás y efecto invernadero

IMPACTO DEL BIOGÁS	
Cantidad de CH_4 emitido	4.821 t CH_4/año
Equivalencia CH_4/CO_2	23
Cantidad de CO_2 equivalente emitido	179.893 t CO_2/año
AUTOMÓVIL	
Consumo vehículo	0,090 l/año
Kilometraje anual	10.000 km/año
Consumo anual de gasolina	900 l/año
CO_2 generado	2,23 t/CO_2 año
Vehículos equivalentes	80.736 vehículos/año
Gases emitidos por conductor	17,1 t/vehículo y año
Gases emitidos por conductor al día	47,0 kg/conductor y día
ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO DEL BIOGÁS	
Energía contenida en el biogás	13,7 kW/kg CH_4
Energía potencial anual	107.226.329 kW · h/año
Energía eléctrica potencial	37.529.215 kW · h(e)/año

Es decir, si no se trata el biogás y se emite libremente a la atmósfera, el efecto invernadero equivale a la libre circulación de 80.000 coches (bajo los parámetros de consumo y kilometraje indicados), mientras que si se recupera y se valoriza en un motor de cogeneración puede producir cerca de 40.000 MW · h eléctricos al año, cifra nada despreciable.

Según un detallado estudio llevado a cabo por la UPC (Universidad Politécnica de Cataluña), cerca del 19% de la contaminación atmosférica de la ciudad de Barcelona se debe a los gases emitidos, y sus efectos secundarios, por el vertedero de Garraf (situado a unos 15 km de la ciudad). Hay que añadir que este vertedero se inauguró en los 80 del siglo pasado y, progresivamente ha ido incorporando las medidas ahora obligatorias de la Directiva sobre vertido a lo largo de los 90. Esta previsto que se clausure en 2006.

En Dinamarca se ha puesto en marcha un plan de acción para ajustarse al Protocolo de Kyoto con la extracción de 24 millones de m^3 de biogás al año, lo que equivale a una reducción de 160.000 toneladas equivalentes de CO_2

7.5. FUNCIONAMIENTO Y REQUISITOS DE UN VERTEDERO CONTROLADO O RELLENO SANITARIO

Un vertedero controlado o relleno sanitario es una instalación en la que se han tomado las medidas necesarias para evitar que la contaminación producida y contenida en los residuos llegue al medio, agua y aire, y afecte al medio ambiente y a la salud de las

personas. Los vertederos incontrolados serían, pues, los que no han tomado ninguna medida preventiva o correctora y representan un riesgo para el medio ambiente y la salud pública.

Las características básicas de un vertedero controlado son:

- Residuos aislados del medio mediante una barrera de arcilla (Hay que señalar que no todas las arcillas son eficaces desde el punto de vista de la impermeabilización, ya que ello es una propiedad especifica de la especie de mineral de arcilla presente).
- Control del espacio ocupado y de la estabilidad del depósito: cada jornada de trabajo se deben compactar los residuos a medida que se depositan.
- Control de animales (roedores, insectos o aves): cada jornada de trabajo se deben cubrir los residuos con arcilla.
- Captación y tratamiento de lixiviados y gases.
- Clausura y recuperación del espacio ocupado una vez finalizada la vida de uso.

Las ventajas e inconvenientes de los vertederos se hallan sintetizados en la Tabla 11.75.

La puesta en marcha de un vertedero controlado se caracteriza por un conjunto de acciones que suponen las siguientes etapas:

Localización del terreno: es necesario un terreno con unas características que garanticen que la contaminación no pasará al medio, para lo que se tiene en consideración:

- Impermeabilidad natural de los terrenos, para evitar el paso de contaminantes a los acuíferos en caso de fallo de la capa impermeable.
- Inexistencia de acuíferos próximos que se utilicen para consumo humano.
- Morfología del terreno apropiada (cubeta) y fácil acceso para comunicar la instalación y el núcleo urbano productor de los residuos.
- Terrenos no inundables: para evitar la concentración de agua en casos de lluvias, que favorecen la generación de lixiviados.

Preparación del vaso de vertido:

- Preparación de la geometría del vaso mediante excavaciones de tierras
- Doble impermeabilización artificial: una combinación de una capa de arcilla compactada si el terreno naturalmente no es arcilloso, y una geomembrana sintética impermeabilizante.
- Encima de estas capas se coloca un sistema de drenaje para la captación y recogida de los lixiviados generados en el interior del vertedero. Los lixiviados son captados por la capa drenante, formada por gravas graníticas, silíceas, basálticas o similares que conducen el lixiviado hacia un punto bajo donde se canaliza mediante tubos de HDPE (polietileno alta densidad) hasta las balsas de almacenamiento de los lixiviados.

Explotación del vertedero: Una vez construido el vaso del vertedero se procede a la deposición de los residuos en la superficie, en unas zonas determinadas llamadas células, módulos o alvéolos. Los residuos pueden llegar a la instalación en fardos (es decir, en balas compactadas con una geometría definida y procedentes de prensas embaladoras) o en bolsas de basuras (son los residuos sin compactar o que han sido ligeramente densificadas en la

Tabla 11.75. Ventajas e inconvenientes de un vertedero

Ventajas	Inconvenientes
Sistema definitivo que no deja residuos.	Necesidad de control y captación de gases y líquidos.
Costos económicos de implantación y de explotación razonablemente reducidos.	Ubicación alejada de los centros de producción (distancias de transportes mayores).
Tecnología de explotación sencilla.	Grandes necesidades de espacio.
Flexibilidad en cuanto a las cantidades variables de residuos a tratar.	Posibilidad de contaminación de las aguas subterráneas y aguas superficiales.
Rapidez entre la decisión de construir la instalación y su puesta en marcha.	No aceptación por parte de la población afectada de la presencia de la instalación.
Posibilidad de recuperar el espacio del terreno una vez clausurado.	Alternativas limitadas para la utilización del vertedero una vez finalizada su vida útil.
Construcción sencilla.	Impacto sobre el paisaje.

caja del camión de recogida). Las balas compactadas se colocan en hileras de una altura no superior a 5 metros y cubiertas por una capa de tierra (con un espesor comprendido entre 20 y 30 cm). En cambio, los residuos sin compactar se colocan por capas, de un espesor variable entre 2 y 8 metros (según la cantidad de residuos a tratar) y cubiertos por unos 30 centímetros de tierra. El extendido de los residuos se realiza con maquinaria compactadora. De hecho la única diferencia es la densidad real del residuo.

Recogida de las aguas superficiales y lixiviados: La lixiviación en un vertedero supone un impacto negativo sobre el medio ambiente, por lo que la instalación debe disponer de un sistema de recogida de aguas que capte:

- Aguas exteriores a la zona de vertido, para impedir que entren las aguas superficiales de lluvia al interior del vertedero. Estas aguas son limpias ya que no han estado en contacto con los residuos, y se desvían, una vez captadas, hacia el exterior de la instalación.
- Aguas superficiales de las zonas cubiertas del vertedero, para verterlas a cauce público una vez se comprueba que están limpias.
- Aguas infiltradas: captadas por una red de drenaje situada en el fondo del vaso del vertedero entre las diferentes capas de residuos y conducidas a su almacenamiento y tratamiento.

Desgasificación del vertedero: la fermentación anaerobia de los residuos genera gases, llamado biogás, rico en metano, lo que supone un riesgo de explosión e incendio en los vertederos. Es necesario realizar una red de captación de biogás con capas drenantes de grava que evacuan el gas a pozos conectados con el exterior. Una vez asegurada la evacuación sin riesgos del biogás se pueden tomar diferentes medidas:

- Evacuar el biogás directamente a la atmósfera, el metano es un gas que produce un gran efecto invernadero.
- Oxidar el biogás a la salida de los pozos mediante antorchas: se desperdicia el poder calorífico del biogás.
- Valorizar el biogás en motores de cogeneración, produciendo electricidad.

Sellado y postclausura de la instalación: Una vez agotada la capacidad del vaso de vertido se procede a su clausura y sellado, con la finalidad de impedir la entrada de agua y la lixiviación. Las operaciones necesarias para la clausura de un vertedero son:

- Igualación de la capa de residuos, de forma que se evite el encharcamiento en la superficie.
- Cobertura de la última capa de residuos con material impermeabilizante, con arcilla o con arcilla y geomembrana sintética, según los casos.
- Adecuación del sistema de desgasificación para su utilización en los siguientes años.
- Colocación de una capa de drenaje para la captación y evacuación hacia el exterior del agua infiltrada de lluvia.
- Capa de tierra soporte, una capa de tierra vegetal y plantación de vegetación, sobre todo en las zonas con pendiente para facilitar la evacuación del agua de escorrentía.
- Seguimiento de la zona clausurada mediante los piezómetros de control de aguas subterráneas (pozos de monitoreo) y los conductos de desgasificación.

Históricamente, los vertederos han sido el método más económico y ambientalmente más aceptado para la evacuación de los residuos. Con el tiempo ha sido preciso introducir unas limitaciones en los vertederos que pueden resumirse en:

- Respecto al producto: sólo para sólidos. Algunos admiten semisólidos con humedades máximas del 65%, otros no admiten residuos RTP (tóxicos y peligrosos) o bien los admite si han sido pretratados. A este respecto la Directiva 1999/31/CE impone una severa restricción a la forma de vertido, obligando al pretratamiento previo de casi todo tipo de residuos.
- Respecto al diseño y funcionamiento del vertedero: alto grado de impermeabilidad, tratamiento de lixiviados, estudios hidrogeológicos y minuciosa regulación de explotación.
- Respecto a la política de tratamiento de residuos: La oposición popular es cada día más fuerte, los residuos vertidos no tienen ninguna posibilidad de ser reciclados y el impacto medioambiental de los vertederos es superior al previsto hace años. Por todo ello las administraciones son cada vez más reacias a la concesión de licencias para la abertura de nuevos vertederos.

Si a todos estos factores se añade la expansión demográfica, el incremento en la generación de residuos, la búsqueda de un lugar adecuado (normalmente lejos de los centros de producción de los

residuos), etc., se comprende que el futuro de los vertederos como sistema de tratamiento de residuos esté muy cuestionado.

En el DVD adjunto, en el punto 16, se muestran sistemas de preparación de vasos para el vertido, así como fotos de vertederos.

7.6. LIMITACIONES QUE IMPONE LA DIRECTIVA RELATIVA AL VERTIDO

La situación actual de los residuos ha propiciado que desde la Unión Europea se haya dibujado la línea a seguir en los próximos años a través de la Directiva 1999/31/CE, de 26 de abril de 1999, relativa al vertido de residuos. Los distintos países la han de transponer en un plazo máximo de 2 años (Artículo 18) España ya lo ha hecho, asumiendo de esta forma las obligaciones que supone y debiendo elaborar, a través de las correspondientes normas estatales, los mecanismos adecuados para su aplicación.

La Directiva surge de una serie de necesidades, siendo a continuación recogidas las más importantes:

- Todas las actividades de vertido han de ser seguras y controladas, reduciendo los efectos sobre el Medio Ambiente y la salud humana.
- Se debe fomentar la prevención, el reciclado y el aprovechamiento de los residuos (en especial para los residuos biodegradables), de forma que no se malgasten los recursos naturales; han de ser estudiadas otras posibilidades tales como la biometanización, el compostaje y la incineración.
- Debe reducirse la cantidad y peligrosidad de los residuos que acaben en vertedero.
- Las instalaciones dedicadas al vertido de residuos deben ser lo más seguras posibles, habiendo de ser perfectamente gestionadas, controladas, etc., especialmente en lo referente a los lixiviados (de acuerdo con la Directiva 75/442/CE), incluyendo el periodo posterior al cierre.
- Han de establecerse normas técnicas para evitar el daño asumible al menor coste de prácticas inadecuadas.
- Deben tomarse medidas contra la producción de biogás incontrolada, debido al efecto que éste tiene en el calentamiento global.
- Han de establecerse procedimientos para la concesión de las autorizaciones administrativas de los vertederos, de conformidad con la Directiva 96/61/CE (IPPC).
- Igualmente han de ser desarrollados distintos procedimientos para la aceptación de los residuos en los vertederos, a fin de evitar daños al Medio Ambiente.
- El precio de la eliminación de los residuos ha de cubrir todas las fases del proceso, hasta el momento en el que el vertedero, una vez clausurado, deje de suponer un problema.

Respecto a la Directiva 96/61/CE (de control y prevención de la contaminación ambiental (también conocida por IPPC), la Directiva 1999/31/CE aclara que el cumplimiento con ésta llevará parejo la adecuación de los requisitos de la primera (Apartado 2, Artículo 1). Debe recordarse que la Directiva IPPC fija a las instalaciones de procesamiento o vertido entre sus objetivos principales.

Los depósitos son clasificados en vertederos para residuos peligrosos, para residuos no peligrosos (de acuerdo con la Directiva 91/689/CEE) y para residuos inertes (Artículo 4). Se excluyen, por no ser considerados vertederos, los casos de instalaciones dedicadas al almacenamiento de los residuos anterior a un proceso de valorización o traslado (Artículo 2); igualmente, queda fuera del ámbito de la Directiva los esparcimientos de fangos tratados para agricultura, la utilización de residuos inertes en obras, de lodos de dragado no peligrosos y de residuos no peligrosos del tratamiento de minerales (Artículo 3).

La Directiva obliga a los distintos países a tomar medidas para lograr que a los 5 años de la fecha tope para su transposición se reduzcan los residuos biodegradables en los vertederos hasta el 75% con respecto a la cantidad generada en 1995, hasta el 50% a los 8 años y hasta el 35% a los 15 años. Los plazos son revisables y se darán ventajas a los países que más porcentaje de residuos municipales destinan a vertedero, en forma de aplazamiento por cuatro años de uno de los objetivos anteriores (Apartados 1 y 2, Artículo 5).

Existen una serie de residuos que no han de ser admitidos en los vertederos (Apartado 3, Artículo 5):

- Residuos líquidos.
- Residuos explosivos, corrosivos, oxidantes e inflamables, con arreglo a la Directiva 91/689/CEE.
- Residuos hospitalarios.
- Neumáticos.
- Otros identificados según Anexo II (obliga a la caracterización de los residuos y al establecimiento de listas de residuos admitidos y no admitidos, dependiendo del riesgo que suponen para el Medio Ambiente y la salud humana por lixiviados, etc.).

Sólo podrán ser vertidos los residuos que hayan sido tratados o los que sin tratar no dispongan de técnicas viables de tratamiento. En los vertederos de residuos no peligrosos se podrán verter residuos municipales, otros no peligrosos según el Anexo II y otros peligrosos no reactivos (estables). Los vertederos de inertes estarán únicamente destinados a inertes (Artículo 6). Los criterios de admisión de residuos en los distintos tipos de vertederos quedan a expensas de las listas de residuos admisibles que han de elaborar los distintos países. Todo el proceso de admisión ha de ser documentado y controlado de forma visual periódicamente por la autoridad (Artículo 11).

La solicitud de autorización debe contener todo lo referente a los residuos que se depositarán, al vertedero (emplazamiento, etc.) y al funcionamiento y control del mismo, habiendo también de cumplir con la Directiva 85/337/CEE de evaluación de impacto ambiental si fuese requerido (Artículo 7). Para la concesión de la autorización se debe asegurar el cumplimiento de la presente Directiva, debiendo de ser comprobado *in situ* por las autoridades pertinentes (Artículo 8); dicha concesión incluirá el tipo de vertedero, la lista de residuos y la cantidad que será admisible, así como los requisitos para la preparación, operaciones de vertido y control del vertedero, así como la obligación del solicitante a informar al menos una vez al año acerca del funcionamiento del vertedero (Artículo 9).

El coste a aplicar por la entidad gestora deberá incluir todas las etapas del proceso de eliminación, incluyendo la del mantenimiento de al menos 30 años del vertedero tras su clausura (Artículo 10). La entidad explotadora será la responsable del vertedero hasta que la autoridad considere que no pueda tener influencia negativa sobre el Medio Ambiente (Artículo 13). Todo ello deberá poder ser conocido por el público general en función de la Directiva 90/313/CEE (Artículo 10).

La Directiva trata de asegurar el control y la vigilancia durante la fase de explotación del vertedero (Artículo 12) a través de la elaboración de una serie de procedimientos (incluidos en el Anexo III) destinados a tal fin, con motivo de asegurar un correcto seguimiento de los parámetros meteorológicos, de emisión de gases, de las aguas y de los lixiviados, tratando de que se puedan conocer con total rapidez situaciones de alarma.

En el plazo de un año a partir de la fecha máxima para la transposición (dos años a partir de la entrada en vigor de la Directiva, el 26 de abril de 1999) la entidad explotadora de un vertedero existente que no cumpla los requisitos de la Directiva ha de elaborar un plan de acondicionamiento. El plazo tope para cerrar el vertedero si no se pueden cumplir es de 8 años.

Los Estados miembros deben presentar un informe cada 3 años a la Comisión sobre la aplicación de la Directiva (Artículo 15); la Comisión adoptará toda propuesta de modificación sobre la normalización de los métodos de control, etc. (Artículo 16).

La Directiva 1999/31/CE, relativa al vertido de residuos, pretende mucho más de lo que realmente cae dentro de su alcance. Desde el punto de vista más práctico limitará riesgos ambientales asumibles directamente a la operación del vertido e, incluso, los indirectos, pudiendo incluirse en éstos a los relacionados con los lixiviados (contaminación de las aguas subterráneas) y a los relacionados con los posteriores a la clausura.

En resumen, la Directiva 1999/31/CE considera la disposición en vertedero como la última opción, primero porque lo que ha ido a parar a un vertedero no se puede recuperar y, segundo por los problemas ambientales que presentan estas instalaciones. Consecuente con lo dispuesto en la Directiva antes citada, la mayoría de los países de la UE imponen fuertes restricciones al vertido y obligan a una importante restauración y revegetación.

7.7. LOS PRETRATAMIENTOS PREVIOS AL VERTIDO

La Directiva 1999/31/CE relativa al vertido de residuos considera que los RSU, en particular la fracción fermentable no debe verterse directamente sin antes haber llevado a cabo un pretratamiento, o proceso de estabilización para mitigar la acción de la materia orgánica y reducir la cantidad de lixiviados y biogás. Como consecuencia de la citada Directiva, se han desarrollado gran cantidad y sistemas de pretratamiento que, en esencia persiguen evitar el vertido de RSU tal y como se genera en origen.

La Figura 11.57 muestra un esquema de un pretratamiento que, en origen es mecánico y termina en uno biológico.

El tratamiento mecánico tiene la ventaja de permitir una selección previa en la que es posible segregar fracciones muy conflictivas durante las etapas siguientes.

Mientras que la Figura 11.58 simboliza otro tipo de pretratamiento. La elección de uno u otro depen-

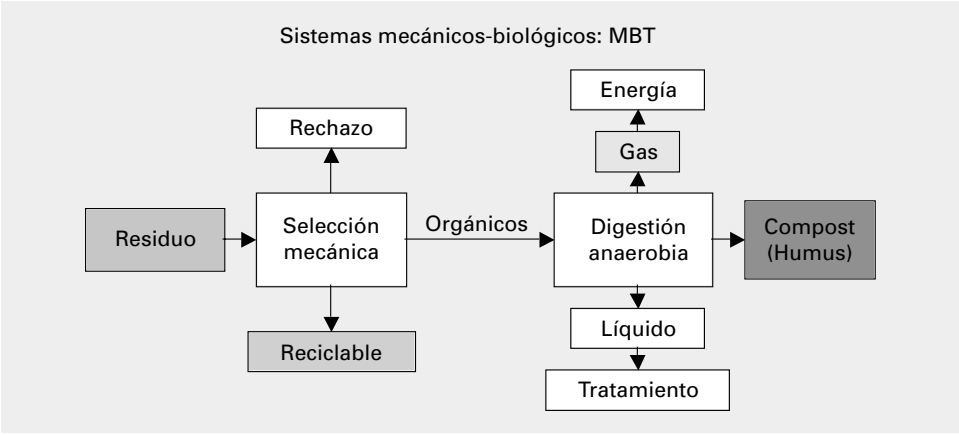


Figura 11.57.
Pretratamiento MBT.

derá de la caracterización del residuo a tratar. En este caso se realiza una digestión anaerobia en primera etapa ya que la humedad del residuo a tratar es muy elevada.

La denominada percolación es otra variante de los pretratamientos mecano/biológicos tendentes a incrementar la disponibilidad de sustancias orgánicas anaerobiamente degradables. En ellos solo se digiere la corriente líquida, evitando así los problemas que supone el alto contenido de impropios presentes en la materia orgánica. Un tromel clasifica los materiales en dos flujos diferenciados. La fracción de mayor tamaño con bajo contenido en materia orgánica y alto poder calorífico puede usarse como combustible alternativo. Los metales también son separados.

El percolador es un reactor cilíndrico horizontal con un agitador interno para mezclar la fracción orgánica, previamente separada, y a la vez apoyar la liberación de los componentes orgánicos de la fase sólida. El agua de proceso entra en el reactor de forma discontinua. A una temperatura media de 40 °C dentro del percolador se lleva a cabo la hidrólisis ácida, la cual aumenta la solubilidad de las sustancias orgánicas. La Figura 11.59 esquematiza dicha tecnología.

De acuerdo con la Directiva 1999/31/CE relativa al vertido, la mayoría de países europeos, como indica la Tabla 11.76, imponen restricciones al vertido de ciertas fracciones:

- A: Limitación al vertido de residuos fermentables (<5% o similar). Ello, junto con las Directivas relativas a la fabricación del compost y a la de aplicación de fangos de EDAR al suelo, no deja otra alternativa que la conversión energética o, si hay recogida selectiva, la metanización.
- B: Prohibición de vertido de sustancias reciclables, consecuente con el propio espíritu de la Directiva.
- C: Prohibición de vertido de sustancias combustibles.
- D: Obligación de pretratamiento (mecánico, biológico, etc.) de muchos residuos antes de su vertido.

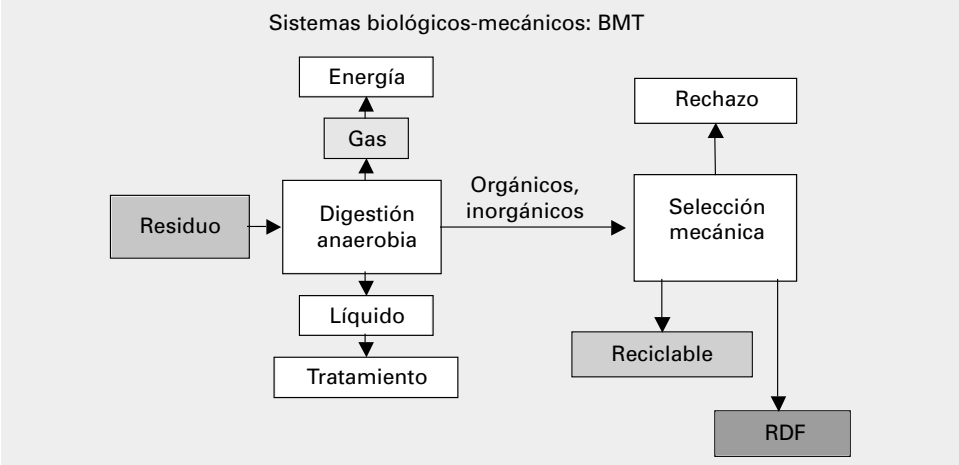


Figura 11.58.
Pretratamiento BMT.

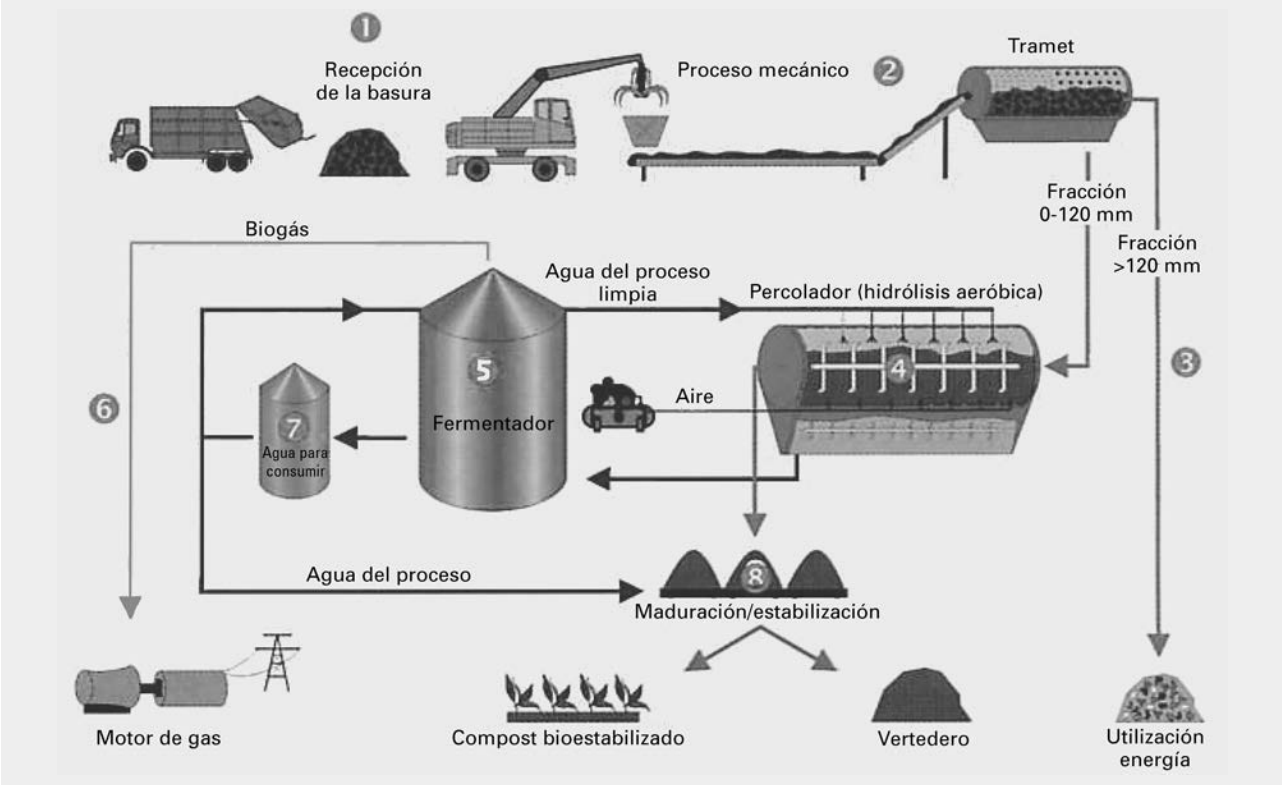


Figura 11.59. Proceso de percolación.

En la Tabla 11.76, la marca (x) indica el estado de cumplimiento de esta normativa en algunos de los países de la UE.

Es obvio que los «puntos limpios» juegan un papel de primer orden para gestionar la presencia de residuos peligrosos, tan comunes en las casas como las pilas o los aceites vegetales usados. Estos últimos son difícilmente degradables una vez usados, contienen sustancias tóxicas y, aunque en este caso el impacto de su vertido incontrolado afecta principalmente a las aguas de las depuradoras, su efecto en los vertederos tampoco es despreciable si se tiene en cuenta la cantidad del mismo que se elimina (Un estudio efectuado por la Comisión de Medio Ambiente de Consejo de Cámaras de Comercio de Cataluña, ha evaluado en casi 100 millones de litros la cantidad anual de aceite usado que se tira, solo en Cataluña).

Tabla 11.76. Limitaciones en las condiciones de vertido

País	A	B	C	D
Alemania	X	X	X	X
Austria	X	X	X	X
Bélgica	X	X	X	X
Dinamarca	X	X	X	
Francia	X	X	X	X
Países Bajos	X	X	X	X
Italia	X	X	X	X
Reino Unido	X			X
España	X			
Grecia				

7.8. VERTEDEROS SECOS

Se entiende por relleno o vertedero seco aquel donde los residuos llegan con una humedad inferior a la habitual. Un relleno sanitario seco, implica el embalaje de los residuos después de la compactación, lo que puede brindar los siguientes beneficios:

- Se alarga la vida del vertedero. Desde el punto de vista económico se consigue colocar entre un 80 a 120% más de residuos en el mismo espacio que con el sistema convencional, compactando los RSU entre 1.000 y 1.200 kg/m^3 para los residuos sólidos urbanos (RSU) y entre 750 a 950 kg/m^3 para los rechazos de una planta de selección de RSU.

- Se evitan la dispersión de residuos ligeros (papeles, plásticos) por el viento. Una bala más o menos compactada protege de los efectos de los vientos fuertes sobre la basura.
- La descomposición de los RSU se vuelve más lenta. La generación de gas y lixiviados es significativamente menor que en un vertedero convencional porque el contacto entre la humedad y el residuo se reduce al máximo.
- Disminuye la concentración de compuestos orgánicos biológicos en el lixiviado de los vertederos y en el caso de los rechazos de planta de selección, los elimina completamente.
- Los problemas de hundimientos en los vertederos, los cuales se prolongan en los dos años siguientes a su clausura, se reducen por la mayor densidad y consistencia de las balas.
- Evita los vectores de contaminación, puesto que a pájaros, roedores, perros, etc. les resulta casi imposible comer de las balas de RSU, debido a su muy alta densidad de compactación.
- Se necesita menos material de cobertura (solo 20 cm. de tierra por capa de 5 fardos de altura), la reducción de volumen de los residuos implica un 70 a 75% menos de cobertura diaria. Frecuentemente solo es necesario cubrir la parte superior de la pila de balas, dejando el frente descubierto. El frente de trabajo (120 balas o 200 m^2) expuesto es más pequeño que un vertedero convencional.
- Un vertedero seco de balas de RSU tiene menos problemas que uno convencional ante condiciones climáticas extremas (estaciones lluviosas).
- Mejora el control de las operaciones en el vertedero. Al reducir el área abierta se asegura la eliminación de recolecciones furtivas y el tráfico de vehículos queda limitado a la zona de trabajo.

7.9. EVOLUCIÓN DEL COSTE DE VERTIDO

En toda la UE la incidencia de la Directiva 1999/31/CE sobre el vertido ha tenido un impacto económico muy importante, que solo se ha notado en ciertas regiones de España. La normativa también tendrá repercusión por los artículos referentes a la clausura y restauración de los antiguos vertederos, o bien los dedicados a la máxima cantidad de materia orgánica aceptada para el vertido.

Tabla 11.77. Costes medios de vertido en algunos países de la UE

País	Mínimo	Máximo	Impuesto verde
España	12,0	20,0	0
Reino Unido	18,0	50,0	8,5
Francia	44,2	67,1	6,0
Dinamarca	59,2	66,3	34,8
Suecia	34,3	106,1	26,7
Italia (norte)	64,1	106,8	10,7
Suiza	61,0	122,0	0
Alemania	53,4	152,5	0
Austria	167,8	190,7	0

Para ello es interesante comparar, como muestra la Tabla 11.77, los costes de vertido de diversos países europeos para ver el nivel de precios (de 1999), en la tabla en €/t, así como la creciente imposición de impuestos verdes.

Hay que entender que se trata de precios medios de vertido y, en España, varían mucho de una comunidad a otra. Así, en Cataluña los costes nunca son inferiores de los 25 €/t, a los que hay que sumar un nuevo impuesto de 10 €/t. (Desde el punto de vista ambiental, estos impuestos que impone la autoridad ambiental se emplean para finalidades de educación o sensibilización y ello puede incidir directamente en la gestión de los residuos peligrosos en los RSU). En cualquier caso es de señalar que, en valores de 2004, España seguía siendo, con diferencia, el país con precio de vertido más barato de los señalados en la tabla.

Es bien conocido que los costes tienen una componente técnica, que según calculan los expertos no debería ser inferior a los 27 €/t, que corresponde a los costes de explotación de un depósito de acuerdo con la citada Directiva 1999/31/CE, y otra componente de carácter político, que es la que tiene más relación con las futuras previsiones para ayudas a la correcta gestión de los residuos peligrosos domésticos. Por otro lado, en los congresos que periódicamente se organizan sobre la gestión en vertederos se debate sobre la necesidad de ampliar en 20 años más, sobre los 30 obligatorios, el tiempo de clausura de los vertederos, debido a las dudas crecientes sobre la peligrosidad que a largo plazo supone este sistema de gestión, especialmente el efecto de los lixiviados y biogás generados a lo largo de décadas.

8. Otros sistemas de tratamiento

Debido a la infinidad de clases de materiales residuales es obvio que se precisa de una clasificación en origen para aplicar al residuo el tratamiento más adecuado en función de su caracterización, de ahí la insistencia en las actuaciones de educación ambiental de los ciudadanos.

Cuando la recogida selectiva no es factible se han desarrollado, en los últimos tiempos una infinidad de sistemas de tratamiento, de los cuales este apartado expondrá unos cuantos.

8.1. LA PELETIZACIÓN

En los casos de recogida en masa, a veces no es rentable, ni ambiental ni económicamente, un triaje exhaustivo de residuos, ya que la calidad de las diferentes fracciones puede ser insuficiente para valorización. En ese caso, la peletización y posterior valorización energética puede ser una buena opción.

Los sistemas de clasificación del RSU para segregar un tipo de combustible alternativo (RDF) solo sirven para separar con eficacia la fracción térmicamente inerte: vidrio y metales. El resto se debe peletizar y usarlo como combustible, puesto que es muy difícil segregar la fracción fermentable de otras materias poco o nada fermentables. En cualquier caso lo que va a resultar imposible es eliminar la contaminación por metales y compuestos tóxicos domiciliarios.

La Figura 11.60 muestra un modelo de extrusora que permite la peletización, a la vez que segrega parte importante del agua contenida en el residuo. Hay que añadir que este tipo de máquinas no han sido desarrolladas para tratar RSU y los prototipos existentes tienen un elevado consumo energético.

En el DVD adjunto, en el punto 17, se muestra información sobre sistemas de peletización.

8.2. LA SEPARACIÓN HÚMEDA

Partiendo de la base de que la cantidad de agua que se puede añadir a la fracción fermentable no es un inconveniente para el futuro tratamiento a la que va a ser destinada, se han desarrollado diversas tecnologías basadas en este tipo de tratamiento.

Uno de los procesos, como muestra la Figura 11.61, parte de una separación primaria llevada a cabo por un tromel convencional. El sistema consta de un hidrociclón donde por la parte superior y central penetra el material a tratar. Éste cae en el interior del agua que se halla sometida a una especial forma de agitación de manera que los impropios presentes de gran tamaño caigan directamente al fondo, mientras la fracción orgánica permanece en el baño. El tiempo de residencia es variable y puede graduarse en función del estado del residuo.

El rebosadero situado en la parte superior vierte el agua saturada de materia orgánica. Esta se filtra por una criba inclinada que va concentrando la carga orgánica que finalmente pasa a un sistema de peletización para su posterior transporte y reciclaje. El agua filtrada se adiciona de nuevo al proceso. Parte del agua se inyecta en forma de «microjets», que generan una especial turbulencia en la masa de material en el

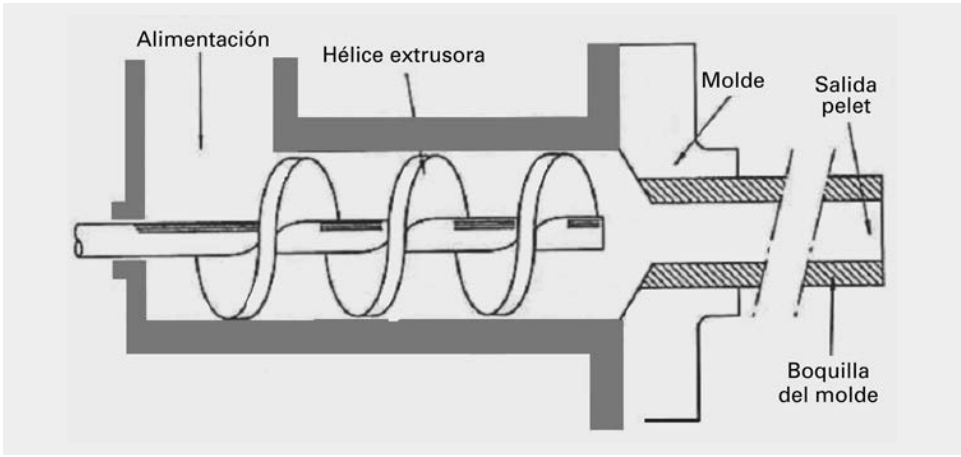


Figura 11.60. Extrusora, concertadora y peletizadora.

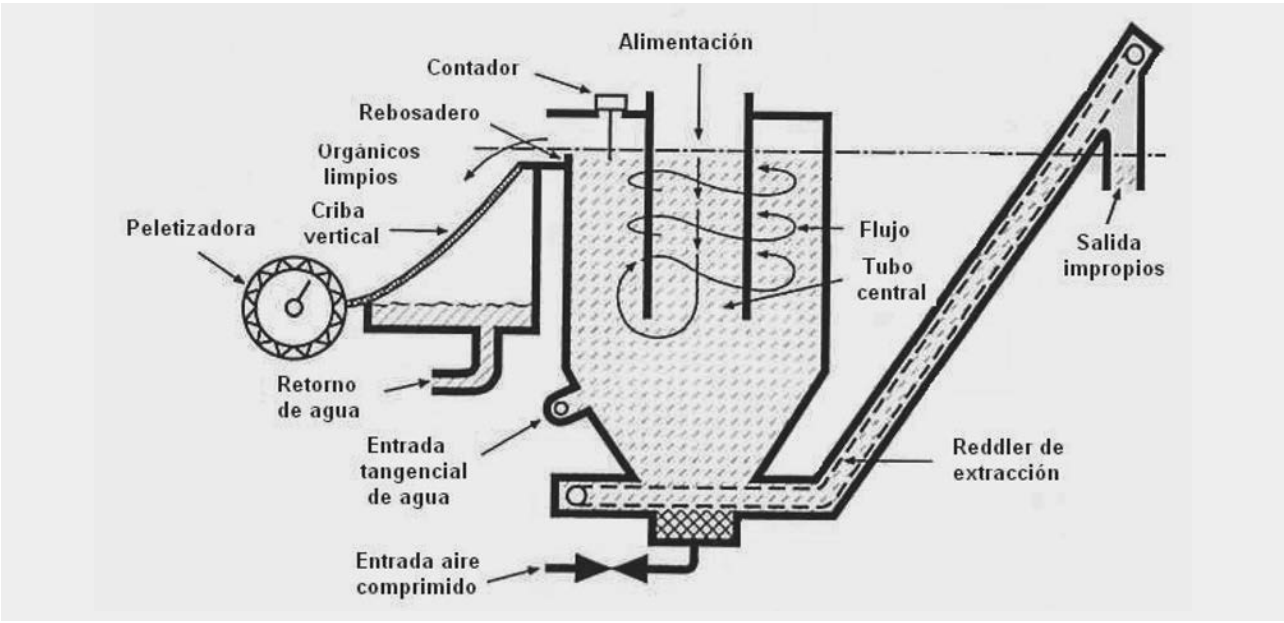


Figura 11.61. Planta de separación por agua.

interior del hidrociclón. También se adiciona aire, en forma de micro burbujas (micro aireación), con lo que se consigue que la fracción fibrosa se incorpore a la parte fermentable en lugar de permanecer en el agua y tener que añadir una dosis mayor de floculante para reducir la viscosidad del líquido. El efecto físico de la aireación se debe a que la microburbuja se adhiere a la fibra y ejerce una acción ascendente segregadora que es aprovechada para su incorporación definitiva a la fracción fermentable.

Las partículas de pequeño tamaño, que se hallan en el seno del líquido, después de pasar por el tamiz primario deben pasar por un clarificador. El sistema es bastante eficiente pero, lógicamente, no puede evitar la incorporación de determinados contaminantes, en particular los metales pesados, si éstos estaban presentes en el residuo. Otra limitación es el elevado consumo de agua.

8.3. SEPARACIÓN POR FLOTACIÓN

La flotación es un método de separación consolidado no solo para el tratamiento de aguas residuales si no también para la recuperación de materia en numerosos procesos industriales. Los materiales dispersados o suspendidos en el agua residual son transportados por las burbujas de aire hasta la superficie hasta donde son eliminadas por medio de un raspador.

El fundamento físico se basa en la ley de Henry-Dalton, según la cual a temperatura constante la solubilidad de un gas en el líquido aumenta proporcionalmente a la presión parcial del gas.

Para captar la mayor cantidad posible de materia flotante, se deben generar burbujas de gas finas y uniformemente repartidas. Dependiendo del estado del agua residual (procedente de haber entrado en contacto con los RSU), la dispersión es buena con burbujas de tamaño inferiores a 30 mm. La Figura 11.62 muestra el principio de funcionamiento.

El aire de la atmósfera es aspirado directamente por la bomba. Este método hace las veces de mezclador. El sistema permite la «limpieza del agua» procedente de los modernos modelos de tratamiento de RSU a base de agua. Esta agua suele reutilizarse en circuito cerrado para el mismo proceso.

8.4. PROCESO BIOLÍQUIDO

Se trata de un sistema de tratamiento de RSU en masa basado en las propiedades hidrodinámicas de las distintas suspensiones que se obtienen con agua. Partiendo del principio de que los materiales inorgánicos, al tener una densidad mayor que el agua se hundirán, mientras que los inorgánicos flotarán.

Los materiales inorgánicos seguirán por una línea que separará los diversos componentes por medio de electroimanes, corrientes de Eddy, separadores ópticos, etc. Hasta conseguir una separación completa. Los materiales residuales son devueltos al tanque principal después de pasar por una criba y que,

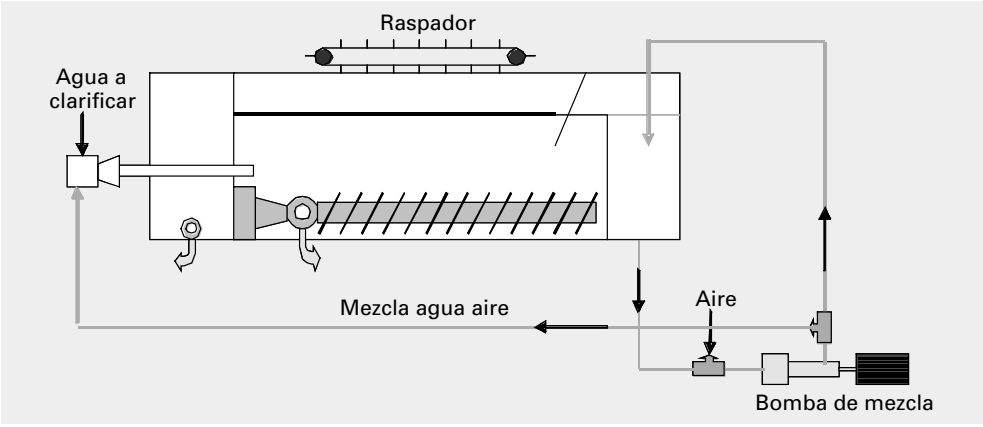


Figura 11.62. Principio de separación por flotación.

finalmente constituye el rechazo (normalmente un 5% del material entrante).

Los materiales orgánicos ligeros, ya separados de los demás componentes, son transportados a un triturador. Seguidamente pasan a un tanque con agua. Los materiales biodegradables absorben agua, mientras que los plásticos no absorben, ello permite una estratificación que permite una succión independiente.

La mezcla de materiales orgánicos biodegradables son conducidos a un reactor anaerobio que genera biogás, con el rechazo se produce compost. La Figura 11.63 reproduce un esquema general de principio.

El residuo es suministrado, en medio acuoso, en camiones cisterna que lo trasladan a la planta de tratamiento donde se vierte directamente a un gran tanque de disolución.

8.4.1. La biopercolación

El proceso Biopercolat, que tiene una planta de 20.000 t/año en Kahlenberg (Alemania), consiste en un tratamiento mecánico/biológico, semejante al descrito anteriormente con algunas diferencias significativas:

- El RSU se somete a un cribado en una malla muy ancha (120-150 mm) lo que supone que más del 95% de la fracción orgánica sea introducida en el sistema. El rechazo: metales, papeles o plásticos de grandes dimensiones pueden ser reciclados.
- La fracción pasante del tamiz entra en el percolador. Se trata de un reactor cerrado con un eje volteador y un suelo móvil. Las sustancias fácilmente solubles y las odoríferas son extraídas mediante lavado (percolación). La fracción orgánica es transformada de forma aerobia dentro del percolador por hidrólisis. El tiempo de retención es de 2-3 días y con la ayuda del mecanismo de volteo se consigue la apertura mecánica de las diversas fracciones del RSU (materias filiformes, papel, compresas, etc.) siendo desprovistos de los componentes minerales que arrastrará el agua.
- El líquido percolado, una vez cribado, entra en un biodigestor que trabaja en el rango mesófilo (30-35 °C) de donde sale gas.

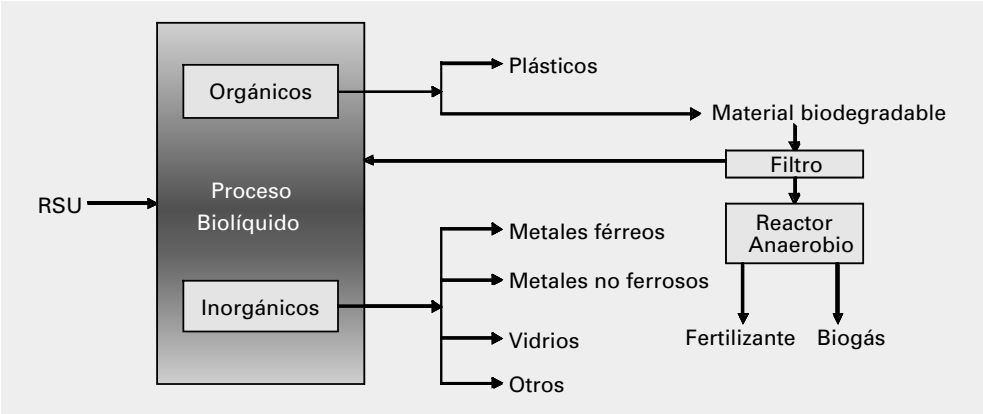


Figura 11.63. Principio del proceso biolíquido.

- El residuo sólido del percolador se deshidrata mediante una prensa mecánica. El agua es recirculada para el propio sistema.

El esquema de funcionamiento se halla resumido en la Figura 11.59.

8.5. SISTEMA TERMONEUMÁTICO

Uno de los grandes problemas en el tratamiento de los RSU tiene que ver con la gran humedad presente que, con frecuencia invalida ciertas vías de gestión, en particular los RSU de muchos lugares donde la fracción fermentable es abrumadoramente mayoritaria. El sistema termoneumático, en realidad no es más que un secador y separador que, a veces puede funcionar con la energía de la incineración de los propios RSU parcialmente secos o que se les ha extraído el agua suficiente para que sean autocombustibles.

En primer lugar el material se introduce en un abrebolsas y tromel para eliminar las fracciones de gran tamaño. Seguidamente, y como muestra el esquema de la Figura 11.64 el residuo se introduce en la corriente de aire caliente por medio de una válvula alveolar.

El calor puede ser proporcionado directamente por medio de un quemador, intercalado entre el compresor y la entrada de RSU. El riesgo que se corre es que alguno de los componentes llegue a la temperatura de ignición y se queme todo puesto que hay un exceso de aire importante. La variante que muestra la Figura propone una recirculación de aire en circuito cerrado, donde la cantidad de oxígeno se puede mantener por debajo el 10% y así se evita todo peligro de incendio.

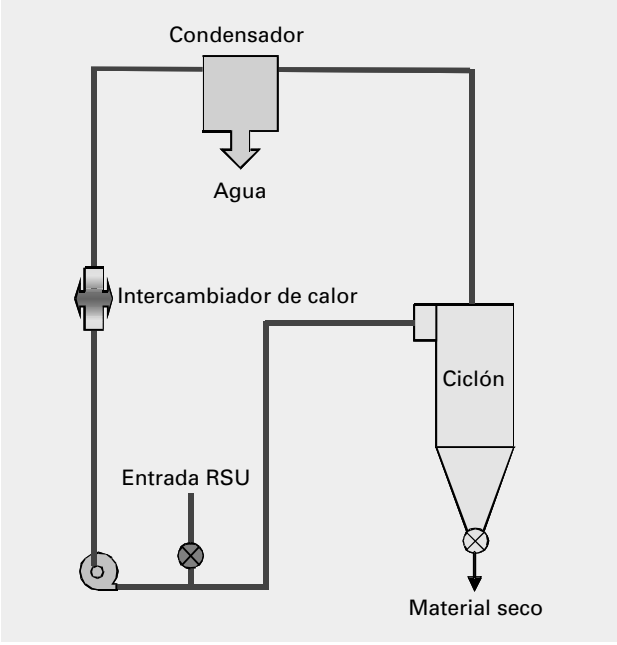


Figura 11.64. Principio de funcionamiento de un secado termoneumático.

8.6. EL TRATAMIENTO CON CAL

Se trata de un modelo para el tratamiento de RSU en masa. Cuando las bolsas de RSU llegan a la planta primero se introducen en un abridor de bolsas, seguidamente pasa por un tromel donde se separan los fracciones de gran tamaño. A continuación por medio de sistemas magnéticos y corrientes de Eddy se extraen las partes metálicas.

A la fracción resultante se le añade cal y agua en un turbo absorbedor, donde tiene lugar una reacción exotérmica durante dos horas y media a una temperatura de 120 °C. A la salida es preciso distinguir entre dos fracciones:

- Elemento mayores de 20 mm. Son, teóricamente, estables e higienizados. No obstante pasan por una serie de aparatos estándar para separar todos los contaminantes presentes: metales, vidrios, plásticos, etc.
- Elementos menores de 20 mm. Se introducen en una mesa densimétrica donde se separan los elementos pesados (vidrio, metales, pilas, etc.) que hayan podido quedar. A continuación en flujo se hace pasar por un ciclón para terminar de separar los elementos impropios.

El producto final, estabilizado e higienizado, por la acción de la cal se emplea como fertilizante para terrenos baldíos.

8.7. LA HIGIENIZACIÓN POR VAPOR

El proceso, diseñado por la firma Ambiensys, está pensado para conseguir los siguientes objetivos:

- Reciclar al máximo las fracciones del RSU para reintroducirlos en el circuito de reciclaje.
- Procesar las fracciones biodegradables para transformarlo en un RDF.

El corazón de la tecnología consta de una autoclave, en forma de tromel rotatorio, que higieniza y seca la fracción biodegradable con vapor de agua (del orden de 7,5 m^3/t RSU procesada), durante unos 45 minutos. El material que sale de la autoclave

constituye un combustible homogéneo de las siguientes características:

- Las bolsas de basura y la mayoría de envases de plástico se han retractilado, transformándose en partículas de geometría esférica, fáciles de manipular.
- Todos los componentes del RSU quedan desligados de manera que es muy fácil la separación de cualquier fracción.
- Se eliminan completamente los olores.
- Se eliminan los lixiviados, ya que la parte líquida se elimina con el vapor de proceso.
- La fracción degradable, como la parte fermentable o el papel, se transforma en una fibra homogénea de biomasa (fibra orgánica).
- La fracción metálica no sufren ningún cambio estructural debido a la baja temperatura del proceso de higienización, en cambio aparecen limpios, sin pinturas y pueden extraerse fácilmente por medios magnéticos o por corrientes de Endders, si son de aluminio.
- El vidrio, constituye una subfracción que puede separarse por medios balísticos.

La planta procesa un RSU, que bien podría catalogarse de fracción resto o «todo uno», con la composición que indica la Tabla 11.78.

Lo lógico consiste en recuperar los metales, el vidrio y las cenizas, con lo que queda un estupendo combustible, formado básicamente por fibra y plásticos, con un PCI superior a las 5.000 kcal/kg y una humedad del orden del 40% (la humedad puede ser menor según se regule el proceso), que está destinada a la gasificación.

En la actualidad se está desarrollando un proyecto conjunto con la empresa canadiense Enerkem, especialista en gasificación de biomasa, donde se intenta usar como combustible esta mezcla de fibra y plásticos y como comburente aire mezclado con el vapor saliente del autoclave.

Tabla 11.78. Composición del RSU tratado.

Fracción	% (peso)
Fermentable	25,2
Papel y cartón	20,4
Plásticos	5,8
Tetrabrics	1,9
Aluminio	1,2
Metales	3,5
Vidrio	6,7
Cenizas, tierras e inertes	2,6
Otros	32,6
Total	**100,0**

8.8. TRATAMIENTO POR MICROONDAS

Las microondas son radiaciones electromagnéticas, no ionizantes, con una frecuencia comprendida entre 300 y 100.000 MHz (longitud de onda entre 1 m y 1 mm) que tienen ciertas similitudes con la luz visible. La frecuencia más empleada es la de 2.450 MHz, que es la más aconsejada para evitar interferencias con instrumentos empleados en las comunicaciones. Así se pueden concentrar en rayos y transmitirse a través de tubos huecos.

A diferencia de los sistemas de calentamiento tradicionales, las microondas penetran en los tejidos extendiéndose el calentamiento a toda la masa. El flujo de calor es, además, muy rápido. Una determinada reacción química puede ser acelerada en presencia de microondas y su mecanismo de acción depende de la propiedad dieléctrica del medio de reacción. Un fenómeno frecuentemente asociado al uso de microondas en los procesos químicos en disolución es el recalentamiento del disolvente, que en un proceso convencional no se produce.

La absorción de microondas por parte de un material dieléctrico tiene el efecto de la transferencia de energia, aumentando por tanto su temperatura.

Los materiales orgánicos, como las bacterias, contienen moléculas dipolares (un polo positivo y otro negativo) como, por ejemplo, las de agua. En general estas moléculas están orientadas al azar. Sin embargo cuando se les aplica un campo eléctrico se orientan de acuerdo con la polaridad del campo, esta es la particularidad que se emplea para el tratamiento de residuos.

El tratamiento térmico a altas temperaturas empleando las microondas se viene empleando en Francia, todavía en pequeña escala (de 200 kilos a 2 toneladas de residuos por lote), alcanzando temperaturas del orden de los 1.200 a 1.500 °C empleando una potencia total de 100 KW a una frecuencia de 915 MHz. Esta tecnología permite la reducción de volumen y la inertización de residuos especiales, materiales con contenido de asbesto y sobre todo es muy usada para el tratamiento de residuos biomédicos. A título de resumen hay que indicar que para que el tratamiento sea efectivo el material ha de contener agua y/o moléculas bipolares.

9. Resumen y conclusiones

Entre las opciones que despiertan mayor rechazo social, vertido e incineración, se han hecho valoraciones comparativas para determinar cual presenta mayores beneficios económicos y ambientales, tal como muestra la Figura 11.65.

La Figura 11.65 muestra que una unidad de RSU estándar (de 1990) genera alrededor de 0,18 unidades de masa de CO_2 equivalente cuando se incinera, mientras que si el destino es el vertido su incidencia es algo menor, 0,144 unidades de masa.

No obstante desde la óptica de la sustentabilidad la valoración es muy diferente. Partiendo de la base de que los RSU son renovables, la excepción sería el plástico, cuando se incinera el CO_2 generado es neutro. Si se vierte, la mitad del biogás es CO_2 también es de naturaleza neutra pero, la otra mitad esta compuesta esencialmente por CH_4 cuyo efecto invernadero es mayor de veinte veces el CO_2. Es decir, a efectos de emisión de gases de efecto invernadero siempre es favorable la incineración.

De hecho, las únicas tecnologías de eliminación son:

- La incineración.
- El vertido.

El resto de tecnologías son intermedias, como muestra la Tabla 11.79, es decir, tratan una parte, o un todo, del residuo y generan a su vez sustancias, y también residuos, que deben ser valorizados en otras instalaciones y, los residuos secundarios han

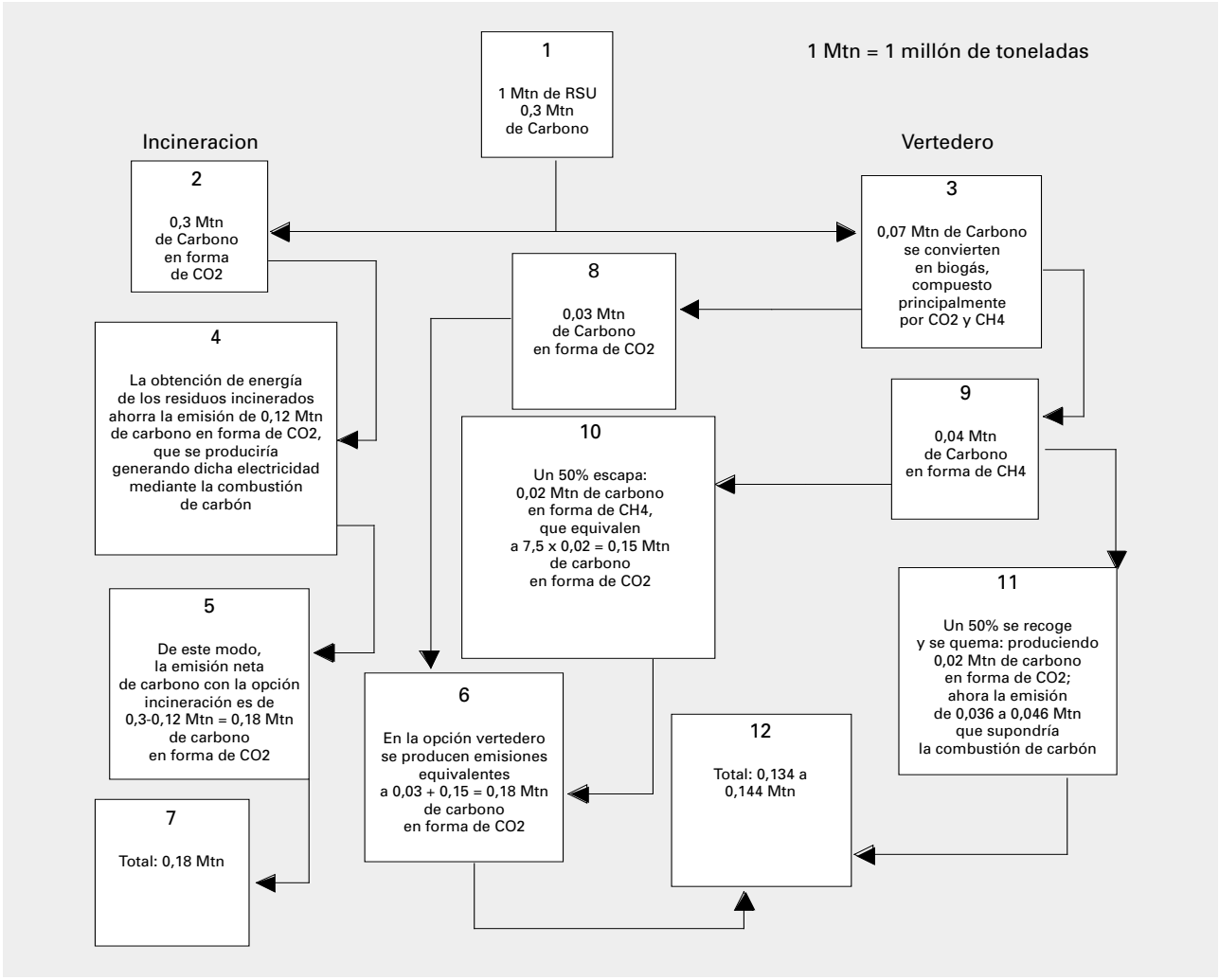


Figura 11.65. Comparación vertido e incineración.

Tabla 11.79. Resumen de los principales sistemas de tratamiento de RSU

Sistema de tratamiento	Tipo de residuo	Procedencia del residuo	Características	General
Vertido	Todo tipo de residuos.	No importa mezcla o recogida en masa.		Requiere grandes espacios.
Incineración	Todo tipo de residuos, mínimo de inertes.	No importa mezcla o recogida en masa.	Los gases deben tratarse.	Electricidad.
Gasificación	Residuos orgánicos homogéneos.	Requiere una selección del residuo, en origen o en planta de triaje.	El gas de síntesis ha de valorizarse y los gases resultantes, tratarlos.	Gas de síntesis/electricidad
Pirólisis	Residuos orgánicos homogéneos, con algo de inorgánicos.	Requiere una selección del residuo, en origen o en planta de triaje.	El gas de síntesis ha de valorizarse y los gases resultantes, tratarlos.	Gas de síntesis, electricidad.
Compostaje	Residuos fermentables homogéneos no contaminados, sin materiales impropios	Recogida selectiva en origen (papeles, plásticos, etc.) o en planta de triaje. Residuos no contaminados		Compost.
Metanización	Residuos fermentables homogéneos no contaminados, sin materiales impropios (papeles, plásticos, etc.)	Recogida selectiva en origen o en planta de triaje. Residuos no contaminados.		Fango para ser compostado. Biogás/electricidad

de ser tratados mediante tecnologías de eliminación.

En caso de no disponer de un sistema de recogida de residuos domésticos peligrosos presentes siempre en los RSU, la mejor solución ambiental es la incineración, ya que la etapa de tratamiento de gases está preparada para prevenir la emisión de contaminantes.

9.1. COSTES DE TRATAMIENTO DE LOS RSU

Los costes son difíciles de establecer puesto que dependen de muchos factores (tecnológicos, ambientales, legales, socioeconómicos, regímenes de tarifas eléctricas, etc.). Sobre todo, en España, cuando quieren homologarse a los que rigen en el resto de la UE hay que resaltar unas grandes diferencias:

- La absoluta preponderancia del vertido (más del 70%).
- La escasa valorización energética (4% frente a una media del 24% en la UE).
- La cifra de recogida selectiva y reciclaje es aún modesta.

Costes de recogida y transporte

Oscilan entre 33 y 52 €/t en función del tamaño y nivel de mecanización de la flota, la distancia a la planta de tratamiento y el urbanismo de la zona.

Costes de la recogida selectiva

Es aún muy incipiente y todavía no hay datos precisos. Sin embargo experiencias como la de Navarra (España), sugiere un coste próximo a los 65 €/t, que probablemente se incrementaran en base a los conciertos con Ecoembes. Lo más probable es que los costes se aumenten en un 50% como ha venido sucediendo en los países del entorno (Datos confirmados por ERRA). Es importante la densidad y distribución de viviendas.

Costes de vertido

En España oscilan entre 18 y 40 €/t (En Cataluña existe desde 2004, sobre el precio indicado, una tasa de 10 €/t), mientras que en el resto de la UE los precios son mucho más elevados.

Los costes, en datos de 2003, varían en función de la calidad del vertedero. La Tabla 11.80 pretende mostrar una síntesis.

Tabla 11.80. Precios de vertido en España

Sistema de vértido	€/t
Sin impermeabilización y una sola operación de cubrimiento.	9,0
Impermeabilización y tratamiento de lixiviados.	21
Cumpliendo la Directiva 1999/31/CE.	33
Requerimiento Directiva y venta electricidad del biogás.	27

Costes de incineración

En España oscilan entre 18 y 35 €/t. Teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

- Capacidad de tratamiento: 300.000 t/año.
- Cantidad de escorias: el 20%, que va a vertedero.
- Cumplimiento de la normativa sobre emisiones.
- Cenizas volantes: 3,5%. Que hay que tratar.
- Ratio de generación: 0,45 kw(e)/kg RSU.
- Impuestos verdes que se le apliquen.

El coste de tratamiento seria de unos 20 €/t.

Costes de la gestión en Ecoparc

Las cifras se refieren al Ecoparc 1, de Barcelona, donde el coste de gestión sobrepasa los 76 /t. (Fuente: Congreso sobre «Fracción Resto» celebrado en Barcelona el 31 de Enero de 2005, organizado por la Agencia Catalana de Residuos y la Comisión de Medio Ambiente del Colegio de Ingenieros Industriales de Cataluña).

9.1.1. El comportamiento del ciudadano frente al coste de gestión de los RSU

Uno de los problemas importantes de la generación y gestión de los RSU es que el ciudadano no suele tener idea del coste que representa la correcta gestión de los RSU. Ancestralmente, en España, la denominada tasa de residuos se engloba en el recibo del agua y el ciudadano no puede calibrar lo que paga por un servicio u otro.

El primer eslabón sería informar a la población de que la cifra que paga a través de este impuesto no cubre, ni de lejos, la gestión de los RSU, lo que obliga a los ayuntamientos a hacer «arreglos» para no desequilibrar las finanzas municipales, es decir buscar la solución más económica que, por regla general, no suele ser la más ecológica.

Recientemente se ha realizado y publicado una encuesta en Gran Bretaña donde los ciudadanos, al enterarse de que cada hogar produce de media unas 4 toneladas de residuos al año y que la cifra se incrementa anualmente en un 3%, se muestran dispuestos a pagar según el volumen de las basuras no separadas para el reciclaje, es decir la fracción resto. Es de suponer que en España la gente, una vez informada respondería en la misma dirección. En Alemania, los hogares han de pagar unos 0,25 € por kg de residuo y en Bélgica una bolsa de basura cuesta en torno a 1,5 €.

9.2. RSU Y ENERGÍAS RENOVABLES

La reciente entrada en vigor del Protocolo de Kyoto, ha espoleado a algunos gobiernos a buscar en los residuos oportunidades para la reducción de los combustibles fósiles y la obtención de bonos de CO_2. En particular en los EEUU donde, al no firmar dicho Protocolo, ha concienciado a las autoridades y empresas a buscar soluciones alternativas. Desde luego, según opinión generalizada, la opción más lógica es la del uso del RSU como generador directo de energía. La Tabla 11.81 es bien significativa, en este sentido, con referencia al destino de los RSU en las tres grandes áreas económicas en los albores del siglo XXI.

Tabla 11.81. Generación de energía a partir de los RSU en 2004

	RSU incinerados (millones de t)	Habitantes (millones)	% Incineración y producción
UE (25)	48,8	390	22,8%
Japón	40,0	128	57,1%
EE UU	26,3	278	17,3%

La tabla precedente pone de relieve que el Japón apuesta por una política de «*Waste-to-energy*» decidida y también hay que añadir que los parámetros en la UE han empeorado, en este sentido, desde la última ampliación.

En el caso de los EE UU, la política de energía barata unida a una gran disposición de tierra ha conducido a un uso masivo de los vertederos, cuya opción en 2004 representaba el 65,6%. Sin embargo ello supone una gran fuente de reserva energética para el futuro.

Los expertos en energía renovable, han diseñado una estrategia para la producción de energías renovables en EE UU que sintetiza la Tabla 11.82 (en ella se excluye la energía hidroeléctrica).

Es decir, el potencial de aprovechamiento de gas de vertedero supone un 13,8% del total. Si realmente, como se piensa, éste país va a apostar por la valorización energética es mucho más lógico optar por los sistemas de conversión energéticos ya que, a parte de ellos permiten valorizar el 100% de la materia orgánica, la tasa de recuperación es muy superior (Se calcula que en un vertedero bien diseñado con un sistema de desgasificación sofisticado se puede llegar a recuperar entre el 50 y 60% del biogás, mientras que en los vertederos antiguos esta cifra puede caer a la mitad).

Tabla 11.82. Generación de energía renovable en EE.UU. (2002) (Fuente DOE)

Energía	Generación kWh x 109	% Energía renovable
Geotérmica	13,52	28,0
Incineración, gasificación, etc.	13,50	28,0
Gas vertedero	6,65	13,8
Biomasa (madera)	8,37	17,4
Térmica solar	0,87	1,8
Solar fotovoltaica	0,01	0,0
Viento	5,30	11,0
Total	48,22	100,0

9.3. ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA (ACV) EN EL TRATAMIENTO DE LOS RSU

Para que un sistema de gestión de residuos urbanos sea bueno debe contemplar todos los aspectos implicados en el proceso para así prevenir y evitar los posibles impactos ambientales. Para evaluar la influencia de los diferentes tratamientos de residuos urbanos sobre el medio ambiente se puede recurrir al Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

Según la normativa ISO 14.040 un ACV puede dividirse en cuatro fases:

- Objetivos y alcance del estudio.
- Análisis de inventario.
- Evaluación de impactos.
- Interpretación.

En un estudio realizado por científicos de la Universidad de Valladolid y la Universidad de Salamanca, en España, en el año 2006 se analizaron desde el punto de vista ambiental distintos tratamientos de residuos urbanos, con un análisis comparativo del perfil ambiental de cuatro procesos de tratamiento:

- Biometanización.
- Compostaje.
- Vertido.
- Incineración.

Usando como herramienta el ACV para determinar cual de esas alternativas resulta más favorable. El estudio se realizó partiendo de la base de que la unidad funcional del tratamiento fuese la tonelada de residuo urbano producida en España en el año 2002 y estableciendo los siguientes límites del sistema:

- Entradas:
  - Residuo puesto a las puertas de las instalaciones de tratamiento.
  - Energía: extraída del combustible.
- Salidas:
  - Energía: energía eléctrica obtenida por la incineración de residuos o combustión de biogás.
  - Compost: salida de las plantas de tratamiento biológico.
  - Emisiones al aire.
  - Emisiones de líquidos.
  - Residuos sólidos.

Para las opciones de tratamiento de residuos urbanos se propusieron los siguientes escenarios considerando que las diferentes entradas y salidas del sistema, de cada posible tratamiento, eran:

- Escenario 1: se considera que el compost obtenido por biometanización no tiene mercado, depositándose directamente en vertedero como residuo.
- Escenario 2: se considera que el compost obtenido por biometanización se emplea en agricultura, evitando la producción de fertilizantes químicos con cantidades equivalentes de N, P y K.
- Escenario 3: el producto del proceso de compostaje no tiene mercado y se deposita en vertedero.
- Escenario 4: el compost se emplea en agricultura, evitando la producción de fertilizantes químicos con cantidades equivalentes de N, P y K.
- Escenario 5: Depósito en vertedero sin recogida de gas ni tratamiento de lixiviados.
- Escenario 6: incineración.

El análisis de los resultados obtenidos en el estudio se realizó con ayuda del software especializado SimaPro 6.0 y el método de evaluación fue el EcoIndicator 99. Con estas herramientas y para las condiciones estudiadas se determinó que el escenario de incineración de los residuos es el mejor; y el peor escenario es el de compostaje sin aprovechamiento del compost. El estudio también muestra que la biometanización es más favorable ambientalmente que el compostaje y el vertido.

Bibliografía

BATES, M. Moving waste transport up a gear. Is this the end of the road for largr vehicles?. *The ISWA Yearbook*, (2002). Vol. 2, núm, 4.

BILITEWSKI, B. *et al. Waste Management*. Ed. Springer-Verlag, Berlín Heidelberg (1994).

BOCIO, A. *et al*. Contaqminantes orgánicos en alimeentos de amplio consumo: concentraciones y exposición a través de la dieta. *Revista Residuos*. (2005). n.º 80.

BÖRGESSON, G. Effects of a gas extracction interruption on emissions of methane and carbon dioxide from landfill. *Environ. Qual*. (1997). 26: 1182-1190.

CANTER, L. *Manual de evaluación de impacto ambiental*. México. McGraw Hill. (1999).

CEDEX (Ministerio de Fomento). Ficha técnica 4.4. *Escorias y cenizas de incineradoras de RSU* (2001).

CORBITT, R. *Standard handbook of environmental engineering*. McGraw-Hill, INC. (1989).

ELIAS, X. *Reciclaje de residuos industriales*. Ed. Díaz de Santos. Madrid (2000).

Elias, X. *Tratamiento y valoración energética de residuos*. Ed. Díaz de Santos, Madrid (2005).

ELIAS, X. Las antorchas frente a las cámaras de combustión. *Revista Ingeniería Química*, 406. Octubre 2003.

ELIAS, X. La presencia de residuos peligrosos en los RSU. *XI Congreso Iberoamericano*. TECMA. Madrid (2004).

ELIAS, X. Aspectos técnocos sobre las enmiendas a la directiva 2000/76/CE sobre incineración. Incineración'2003. *II Jornadas técnicas sobre incineración*. Madrid (2003).

ELIAS, X. Posibilidades de las pirólisis en el tratamiento de los residuos. *Revista Residuos*. (2002), núm. 68.

ELIAS, X. Gestión de los residuos sanitarios. *Revista ROL*. (2004), núm. 27.

ELIAS, X. La presencia de los residuos peligrosos en los RSU condiciona el modelo de gestión de los mismos. *Revista Residuos*. (2004), núm. 83.

ELIAS, X. La valorización energética de los residuos: una alternativa compatible con el protocolo de Kioto. *Revista Residuos*. (2004), núm. 80.

ELIAS, X. Uso de combustibles alternativos. Tecnologías aplicables. *Revista Residuos*. (2003), núm. 71.

ELIAS, X., JURADO, L. Las tecnologías de valoración de los residuos orgánicos en función del grado de contaminación de los residuos de partida. *Revista Residuos*. (2004), núm. 78.

FELIUBADALÓ, J. La gestió d'un abocador controlat: diverses tecnologies. La gestió municipal dels residus sòlids urbans I. *Estudis i monografies* 16. Diputació de Barcelona.

FUENTES ALCOCER, M., (2004); Conferencia «Gestión integral de residuos sólidos de Mérida». *XII Congreso Internacional Ambiental de CONIECO*, Enviro-Pro TECOMEX 2004, Septiembre 2004.

GEDESMA. La recogida selectiva de residuos de envases en la Comunidad de Madrid. *Revista Residuos*. (1998), núm. 43.

GEALT, M. A., LEVIN, M. *Biotratamiento de residuos tóxicos y peligrosos*. México. McGraw Hill (1997).

GROVER, V. I., *Recovering energy from waste: various aspects*. Science Publishers, Inc. (2002).

LARRAURI, E., ROBERTSON, C., KÖHNLECHER, R., EVANGELOU, M. *et al*. Separación por medios electrostáticos del papel, cartón y plástico en diferentes ciudades. *Revista Residuos*. (1998), núm. 45.

LUND, H. *The McGraw-Hill recycling handbook*. México. McGraw-Hill. (1993)

LUND, H. *Manual McGraw-Hill de reciclaje*. México. McGraw-Hill, Inc. (1996).

KIELY, G. *Ingeniería ambiental, fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión*. México. Ed. McGraw-Hill. (1999).

MANSER, A. G. R. KEELING, A. A. *Processing and recycling municipal waste*. Lewis Publishers. Boca Raton (EE.UU.) (1996).

MCCARTHY, T. SIMÖES, P. Unleash the power of biogas. *Waste Management World*. (2005). September.

NÚÑEZ, Y. *et al.* Análisis de ciclo de vida comparativo de tratamiento de residuos urbanos. *Revista Residuos*. (2006), núm. 92.

OLABE, A. Recogida selectiva de residuos e instrumentos económicos. *Revista Residuos*. (1998), núm. 43.

PAGANS, E. *et al.* La importancia de la caracterización de la fracción orgánica de los residuos municipales. Metodología utilizada y consecuencias. *Revista Residuos*. (2004), núm. 77.

POLPRASERT, C. *Organic waste recycling: technology and management*. Chischester. Ed. John Wiley&Sons. (1996).

REAL DECRETO 653/2003 Relativo a la incineración de residuos peligrosos. Madrid (2003).

RIGOLA, M. Producción más limpia. Rubes Editorial, SA. (1998).

ROBERT B. DEAN. Incineration of municipals waste. Ed. Academic Press (1988).

State of California Air Resource Board, *The landfill gas testing program: a second report to the California Legislature*. Sacramento California (EE UU) (1989).

TCHOBANOGLOUS, G., KREITH, F. *Handbook of solid waste management*. New York. Ed. McGraw-Hill. (2002).

TCHOBANOGLOUS, G., Theisen, H., Vigil, S. *Getión integral de residuos tóxicos*. México. Ed. McGraw-Hill. (1993).

THOMAS, A. Optimización del aprovechamiento energético de biogás en vertederos. *Revista Residuos*. (2003), núm. 70.

TILLMAN, D., Harding, S. *Fuels of opportunity: characteristics and uses in combustion systems*. Ed. Elsevier, Kidlington (Oxford) U.K. (2004).

VAN GERVEN, T, *et al.* Remains of the grate. Options for treatment of incineration residues. *Waste Management World*. (2005), July.

VELTZÉ, S. A. Managing without landfill. The Danish example. *The ISWA Yearbook*. (2002). Vol. 2, núm 1.

www.iarc.fr

ORGANISMOS

- AGENCIA DE RESIDUOS DE CATALUÑA del Departamento de Medio Ambiente del Gobierno Autónomo Catalán. www.arc_cat.net
- ATEGRUS, Asociación Técnica para la Gestión de Residuos y medio Ambiente. www.ategrus.org
- BOLSA DE SUBPRODUCTOS DE CATALUÑA. www.subproductes.com
- ENTIDAD METROPOLITANA DEL MEDIO AMBIENTE del ÁREA METROPOLITANA DE BARCELONA. http://www.ema-amb.com/
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA DE ESPAÑA. www.ine.es
- ISR-CER. Instituto de sostenibilidad de los residuos del Club Español de los Residuos. www.isrcer.org
- ISWA, International Solid Waste Association. www.iswa.org
- MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE DE ESPAÑA. www.mma.es
- UNIÓN EUROPEA (legislación, políticas y enlaces a todas las instituciones dependientes o relacionadas), http://europa.eu.int/comm/environment

SEMINARIOS

ELIAS, X. Universidad de Piura (Perú). Seminario sobre valorización de residuos. (2004).

ELIAS, X. Universidad Nacional y CNPML (Centro Nacional de Producción Más Limpia). Bogotá, Colombia. Seminario sobre incineración. (2004).

ELIAS, X. FUNIBER (Fundación Universitaria Iberoamericana) y Universidad de Chile. Santiago de Chile. Seminario Valorización energética de residuos. Aspectos energéticos y ambientales. (2004).

ELIAS, X. México DF. Conferencia a técnicos del Área Metropolitana del Distrito Federal y del gobierno del Estado de México sobre modelos de gestión de residuos urbanos. (2003).

ELIAS, X. IQS (Instituto Químico de Sarriá, Universidad Ramón Llull, Cataluña, España). Master en ingeniería y gestión ambiental. (1999-2005).

ELIAS, X. ICT (Instituto Catalán de Tecnología, Universidad Politécnica de Cataluña y Colegio de Ingenieros Industriales). Master en Tecnología Ambiental. (2000-2005).

Vías de tratamiento y valorización de fangos de depuradora

12

Xavier Elias

ÍNDICE

1. Generalidades 911
2. Vías tradicionales de gestión de fangos de EDAR 912
2.1. El modelo de gestión acorde con las directrices de la UE 913
2.2. La minimización de fangos 914
2.3. La valorización convencional de la fracción orgánica 915
2.4. La valorización de la fracción inorgánica 917
2.5. La gestión de los fangos desde el punto de vista energético 921
2.6. La eficacia de las conversiones energéticas 928
2.7. Los procesos energéticos y la contaminación 930
3. La generación de fangos de EDAR 932
3.1. Generación de fangos por comunidades autónomas 932
3.2. Destino de los fangos 932
3.3. Evolución de la gestión de fangos en la UE 934
4. Caracterización de fangos de EDAR 935
4.1. La caracterización del fango 936
4.2. Línea de generación de fangos 941
4.3. Tipos de fangos 944
4.4. Análisis de un fango típico de EDAR 945
5. El fango de EDAR como combustible 947
5.1. La estructura energética del fango 948
6. La biodegradabilidad 949
6.1. Tipos de residuos fermentables 949
6.2. Propiedades biológicas de los fangos 950
6.3. Tamaño de partícula y biodegradabilidad 951
6.4. Problemática de los fangos 952
7. Valorizaciones energéticas 954
7.1. La incineración de los fangos 955
7.2. La valorización de los fangos de EDAR en hornos de clínquer 957
7.3. Valorización de fangos en centrales termoeléctricas 959
7.4. El secado de los fangos de EDAR 960
7.5. La gasificación 978
7.6. Valorización mediante incineración 984
7.7. Otros tratamientos 987
8. La vitrificación de los residuos secundarios de los procesos térmicos 989
8.1. El horno de vitrificar residuos secundarios de fangos de EDAR 989
8.2. El material vitrificado 991
8.3. El proceso de residuo cero en la valorización de fangos 991
9. El vertido de los fangos 993
9.1. Costes de vertido de fangos de EDAR 993
9.2. Incidencia de la directiva 1999/31/CE, relativa al vertido de residuos orgánicos, reciclables y combustibles 993
10. Los fangos y lodos industriales 994
Bibliografía 995

RESUMEN

Este capítulo comienza llevando a cabo una revisión de las diversas vías de gestión de fangos de EDAR.

La parte central del capítulo se destina al estudio de las diversas posibilidades de reciclaje de la fracción orgánica e inorgánica que componen los fangos.

Atendiendo a las características del fango producido en las ciudades industriales, como son la mayoría de las existentes en la UE, el capítulo ahonda en las posibilidades de gestión sostenible y residuo cero.

1. Generalidades

La Directiva 91/271/CE, transpuesta al ordenamiento jurídico interno español como Real Decreto de 11/95 de 28 de diciembre, establece para los estados miembros la obligación de depurar todas las aguas residuales de poblaciones mayores de 2.000 habitantes antes del 31 de diciembre de 2005.

La misión de las EDAR (Estación Depuradora de Aguas Residuales) consiste en la depuración de las aguas residuales de las diferentes poblaciones hasta alcanzar las condiciones de vertido a cauce público obligadas por las diversas normativas en vigor. Las aguas residuales urbanas tienen una concentración de contaminantes baja, ya que por termino medio sólo es del 0,07%. La fracción sólida y buena parte de la soluble contenidas en el agua pasan a formar el fango, así pues el fango tiene una gran cantidad de agua. Como sea que cada vez es más caro y complicado el transporte y el uso de los vertederos como sistema de eliminación de fangos, de hecho esta vía se encuentra en fase de superación de acuerdo con la Directiva 1999/31/CE relativa al vertido de residuos; la acción mas lógica es la de reducir el agua contenida en los fangos.

Desde el punto de vista ambiental la depuración de las aguas transfiere los contaminantes a los fangos resultantes; las aguas quedarán, teóricamente, limpias pero el problema subsiste en los fangos. Las vías tradicionales de eliminación de éstos como la aplicación a la agricultura, ya sea directamente por vertido sobre el terreno como indirectamente a través de la fabricación del compost, etc., han quedado severamente restringidas por la promulgación de la Directiva 86/728/CEE relativa al uso de los fangos de depuración en la agricultura (transpuesta como RD 1310/1990). Además, estas soluciones se han complicado extraordinariamente con la expansión de la ganadería intensiva, puesto que hay un exceso de residuos de carácter orgánico que resulta excedentario.

Para afrontar el problema, la primera solución ha consistido en secar los fangos hasta una sequedad del 90% (a salida de EDAR, lo normal es una sequedad estándar del 23%), lo que ha permitido reducir considerablemente la cantidad a transportar a depósito controlado. No obstante, esta operación es cara y la introducción de la cogeneración como soporte económico de la gestión se ha revelado poco eficiente. Es por ello forzoso buscar nuevas vías de valorización más acordes con las directrices ambientales tanto en lo concerniente a los fangos de EDAR que disponen de secado térmico como los procedentes de una línea de deshidratación.

La gestión de los fangos de EDAR lleva asociada, en todas sus etapas de tratamiento, un consumo energético notable. El gasto energético originado en la fase de aireación (depuración biológica) es importante pero donde el consumo se destaca es en el secado térmico. Teniendo en cuenta que el fango es un combustible, parece un contrasentido no aprovechar este recurso y usar combustibles fósiles en todas las etapas de tratamiento.

En el DVD adjunto, en el punto 1, se muestran diversos sistemas de aireación usados en la depuración biológica.

La problemática en el caso de España se agudizará por dos razones: España es un país carente de energía fósil convencional y porque la entrada en vigor de los compromisos de Kyoto atrapa a España en mala posición, puesto que obligará al país a ser un comprador neto de derechos de emisión de CO_2. En los últimos 20 años ha sido sorprendente comprobar que los costes de la energía, en valores reales, han disminuido. En el año 1973 el precio del barril de petróleo era de 11,65 US$ (equivalentes a 42 US$ actuales), en el año 1980 el precio era de 35,7 US$ (82 US$ actuales), mientras que en el año 2005 el precio de cotización del barril era de 60 US$. Aplicando la ley de la oferta y la demanda, la lógica lleva a creer que pronto el precio del barril podría alcanzar 86 US$.

No cabe duda que el precio, relativamente moderado, del petróleo ha sido uno de los factores que ha contribuido significativamente a aumentar el consumo energético a escala global. A pesar de ello, los indicadores externos obligaron a pensar que en el año 2006 se produciría un punto de inflexión, a partir del cual los precios de la energía provocaron un cambio en la tendencia y un incremento en el consumo energético.

El esquema y el espíritu de la Directiva 2003/87/CE, referente a los derechos de emisión, consiste en fijar unos cupos de emisión de dióxido de carbono para que el exceso emitido deba obtenerse de

otros sectores u otros países que, debido a su estructura, dispongan de sumideros (bosques) y de excedentes de cupos de emisión. Las nuevas tecnologías deben permitir cumplir con uno, o más de uno, de los principales objetivos para la gestión de la energía indicados a continuación:

- Alcanzar un ahorro energético, ya sea combinando u optimizando los procesos. El secado térmicamente sostenible de fangos de EDAR constituye un ejemplo excelente.
- Diversificar, o mejor, adoptar aquellas tecnologías que permitan la incorporación de fuentes renovables de energía.
- Ambientalizar los procesos. No es suficiente el cambio de recurso energético sino que este proceso debe hacerse de forma respetuosa con el medio ambiente.
- Se espera que las fuentes de energía renovable jueguen un importante papel en la diversificación del suministro de la energía en la UE. En la práctica se considera que tan sólo la energía procedente de la biomasa y la eólica tienen posibilidades reales de crecimiento.

Los elementos básicos de una correcta política energética deben ser:

- Propiciar el crecimiento económico de manera que el suministro de energía no sea en ningún caso un cuello de botella. En el caso del secado térmico de fangos, el incremento del coste de los combustibles fósiles ha llegado a colapsar algunas instalaciones.
- Garantizar la seguridad de suministro en condiciones adecuadas y asumibles en términos de calidad y precio, a pesar de la muy elevada dependencia exterior.
- Compatibilizar el consumo de la energía con una protección efectiva del medio ambiente, de manera que se cumplan las exigencias de un desarrollo sostenible a largo plazo. En este sentido vale la pena hacer una reflexión sobre las posibilidades del secado solar de los fangos, como se verá más adelante.

2. Vías tradicionales de gestión de fangos de EDAR

Teniendo en cuenta las principales características de los fangos, es decir, la cantidad de agua y el contenido creciente de contaminantes, parece entreverse que las vías de tratamiento de fangos tradicionales van a dar entrada a otras que pongan mayor énfasis en el coste asociado del combustible (en particular el gas natural) y los vertederos.

La evaluación a medio plazo de los gastos de explotación de un sistema de postratamiento de fangos es difícil de llevar a cabo a causa de los siguientes factores, que no dependen sólo del entorno geográfico:

- La previsión de la evolución del coste del gas natural (es el combustible más usado para el secado), teniendo en cuenta que este combustible está ligado a los frecuentes incrementos del precio del petróleo.
- La evolución de los costes de los vertederos, claramente al alza pensando en la aplicación de la legislación europea encaminada a la prohibición del vertido de la materia orgánica.

Una vez los fangos han salido de la estación de fangos, con una sequedad media del 23%, es preciso llevar a cabo sobre ellos un postratamiento. Las líneas convencionales de postratamiento son:

- Depósito controlado.
- Valorización energética.
- Aplicación al suelo.

Bajo la denominación «aplicación al suelo» se agrupa todo un conjunto de vías de gestión de fangos que van desde la agricultura de producción (actividad cada día más contestada, vigilada y restringida debido a la naturaleza del fango. Por ejemplo, esta práctica se halla prohibida en los Países Bajos y en Suiza lo estará a partir de 2008) hasta material «alternativo» para obra civil. A veces, la actividad agrícola se realiza de forma indirecta pasando por un compostaje (que con ligeras diferencias adolece de los mismos problemas que la aplicación directa). La restauración de espacios degradados, en particular viejas canteras, también entraña ciertos problemas pero esta vez debido al componente mayoritario del fango, la materia orgánica, que da lugar a episodios de inestabilidad mecánica. En jardinería las posibilidades son muy limitadas. Si bien la «aplicación al sue-

lo» es la opción mayoritaria en estos momentos, está previsto un cambio paulatino de orientación y evolucionar hacia la valorización energética.

En el epígrafe de valorización energética se integran unas vías de gestión variadas que es preciso diferenciar y comentar:

- El secado térmico. En el contexto actual esta vía es un paso obligado hacia el depósito controlado, ya que los fangos no son admitidos en el vertedero con una humedad superior al 65%. Por otra parte, la naturaleza de algunos fangos contienen una cantidad de contaminantes que, incluso una vez secos, los invalida para las aplicaciones convencionales.
- La valorización en plantas cementeras. El horno de clínquer es un buen candidato a incinerar casi todo tipo de combustibles orgánicos, y entre ellos los fangos de EDAR residuales, ya que cumple con los dos requisitos más importantes: a) trabaja a alta temperatura. La temperatura mínima de proceso siempre es superior a los 1.250 ℃ (no hay que confundir la temperatura media del proceso que es, a efectos prácticos, la que condiciona el comportamiento del residuo introducido con la temperatura de llama que puede sobrepasar los 1.800 ℃); b) el tiempo de residencia de los gases es elevado. Incluso partiendo de la base de que la volatilización y la gasificación es lenta (caso de los neumáticos) el tiempo de residencia sigue siendo alto.
- Por lo general los compuestos orgánicos, como los COV's, frecuentes en los fangos, se destruyen sin problemas pero otros materiales inorgánicos pueden tener dificultades. Desde el punto de vista de la valorización la adición de residuos puede introducir una serie de elementos perjudiciales para el clínquer como Mg, P, Cr, Ti, etc.
  Otros elementos, sin interferir en la calidad del clínquer, procedentes de la introducción de residuos que contengan metales pesados deben vigilarse. Los metales, atendiendo a su volatilidad, pueden clasificarse en: a) metales que ellos mismos, o sus compuestos, no son volátiles: Ba, Be, Cr, Ni, V, Al, Ti, Ca, Fe, Mn, Cu y Ag; b) metales que ellos o sus compuestos son semivolátiles: Sb, Cd, Pb, As, Se, Zn, K y Na; c) metales que ellos y sus compuestos son volátiles: Hg y Tl.

En buena lógica, al secado térmico no debería llamarse valorización energética, puesto que el proceso de evaporación de agua se realiza, en la mayor parte de las veces, con un combustible fósil y, hasta hoy, el material resultante se deposita en vertedero. En la UE al secado térmico no se le denomina valorización energética sino pretratamiento. Valorización energética debe llamarse cuando se libera el calor del combustible, ya sea en la incineración, en la gasificación, en la cementera, en una central termoeléctrica o en una instalación similar.

En cuanto al depósito controlado, se entiende por tal toda gestión de fango que va a parar directamente al vertedero. A este respecto vale la pena hacer también unos comentarios. La ya citada Directiva 1999/31/CE hace hincapié en los diversos pretratamientos antes del vertido de los fangos:

- El secado térmico puede catalogarse de pretratamiento.
- En otras latitudes exigen un tratamiento previo de inmovilización.

En resumen, en la UE parece que el vertido en masa de los fangos ha tocado techo.

2.1. EL MODELO DE GESTIÓN ACORDE CON LAS DIRECTRICES DE LA UE

La gestión de los fangos, como cualquier otra tipología de residuos, debe seguir las directrices que emanan de las Directivas comunitarias, cuya jerarquía de actuación puede sintetizarse en:

- Minimización.
- Valorización.
- Tratamiento y vertido.

En la Figura 12.1 se esquematiza la estrategia general en la gestión de los fangos que se irá desarrollando a lo largo de este capítulo y que, por otra parte, secuencia el modelo de gestión que se debería seguir según la calidad del fango. En la parte izquierda aparecen dos modalidades bien conocidas:

- La aplicación al suelo.
- El compostaje.

Es obvio que para llevar a cabo cualquiera de estas actuaciones el fango ha de estar razonablemente limpio («fango limpio»), en particular de elementos inorgánicos contaminantes.

Cuando esta premisa no se cumple, el «fango sucio» debería someterse a diversos procesos de valorización que en grandes grupos pueden dividirse en:

- Procesos cerámicos. Donde uno de los principales requisitos es la garantía de inertización de los contaminantes en la matriz del silicato.

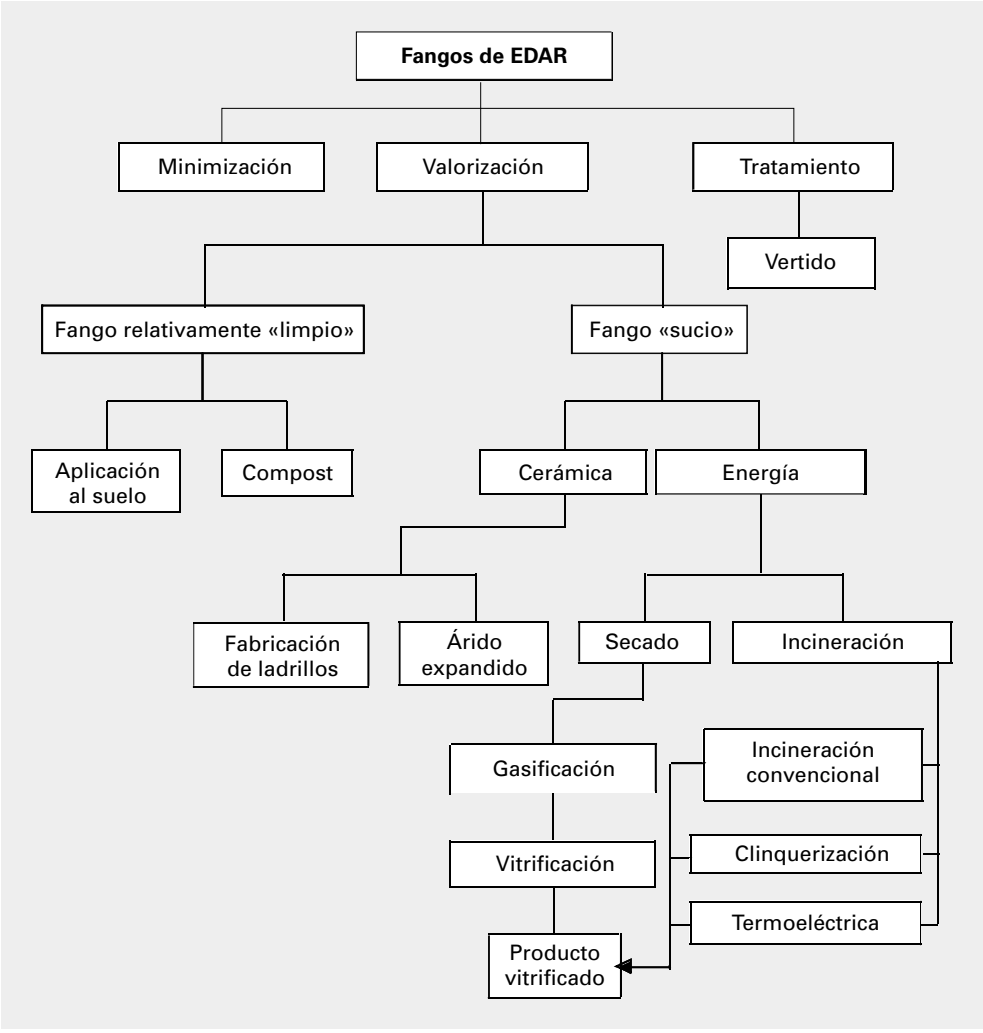


Figura 12.1. Esquema general gestión de fangos de EDAR.

- Procesos energéticos, donde se da preferencia a la valorización de la fracción orgánica, pero teniendo muy en cuenta el tratamiento de la parte inorgánica.

Lógicamente los fangos «limpios» pueden también tratarse energéticamente mientras que los «sucios» no pueden compostarse ni aplicarse al suelo.

2.2. LA MINIMIZACIÓN DE FANGOS

El término minimización debe entenderse como una reducción de la cantidad de agua presente en el fango, de cara a reducir las dimensiones del secado, o bien la cantidad de materia inorgánica presente en el fango seco ya que mayoritariamente procede de los tratamientos que se llevan a cabo en la propia EDAR.

Pese a que aparentemente parezca un contrasentido, la generación de fangos seguirá aumentando ya que por imperativo legal es preciso depurar las aguas residuales y ello, obviamente, hará incrementar la producción de fangos. Sin embargo, lo que es deseable es estudiar la forma y estructura en que el fango debe abandonar la EDAR, que es de la única manera que se puede minimizar la generación de fangos.

Cosa diferente es que se pretenda, en un futuro, llevar a cabo una gestión del fango atendiendo a su caracterización estándar. La composición másica de los fangos es, en términos generales, la siguiente:

- Grasas y lípidos: 10-15%
- Proteínas: 30-40% (N y S forman parte de las proteínas)
- Hidratos de carbono: 10-15%
- P (en forma de fosfato): 2-3%
- Cl (como cloruros): 0,5-1%
- Materias inorgánicas: < 50%

Un tratamiento alternativo por hidrólisis presenta la ventaja que no es preceptivo un secado previo de los fangos y con ello es posible recuperar las fracciones de grasas y lípidos para ser transformadas en biodiesel. El tratamiento hidrolítico transforma las proteínas en aminoácidos y los hidratos de carbono en hidroxialdehidos e hidroxiácidos.

Por supuesto todo ello supone abandonar el sistema tradicional de EDAR tal y como se conciben hoy en día. Otra reflexión preliminar se detalla más adelante: las aguas que se vierten, después de las EDAR, contienen grandes cantidades de metales pesados, es decir, la concepción actual de estas instalaciones no son capaces de captar y transferir a los fangos la mayor parte de los metales.

2.3. LA VALORIZACIÓN CONVENCIONAL DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA

Las posibles valorizaciones convencionales de la fracción orgánica aplicada al suelo y compostaje, son bien conocidas y no es objeto de este apartado insistir en ello. La opción diferenciable estriba precisamente en la caracterización de la fracción inorgánica que de manera indisoluble acompaña a la parte orgánica. De todas maneras se realizarán unos breves comentarios sobre cada una de ellas. No obstante, tratándose de fangos biológicos, que son la única manera en que tiene sentido el compostaje, no hay que olvidar que más de un 30% en peso del fango está constituido por materia inorgánica y, por tanto, no compostable.

Recientemente se ha acuñado el término biosecado que no es más que un proceso de compostaje aerobio en túneles aireados por la parte inferior. La aportación de aire desencadena una serie de reacciones que comportan la elevación de la temperatura y, como resultado, la evaporación de buena parte del agua.

Existen una infinidad de tratamientos biológicos. En este apartado sólo van a comentarse aquellos que tienen interés directo en el tratamiento de fangos. Un resumen sencillo sería:

- *Procesos biológicos aerobios:* Compostaje, fangos activados.
- *Procesos anaerobios:* Digestión anaerobia, metanización.

No obstante, en la literatura habitual referente a fangos se emplea otra nomenclatura, como se verá en los apartados posteriores.

2.3.1. La aplicación al suelo y los metales pesados

La aplicación de fangos directamente al suelo ha sido un sistema tradicionalmente usado debido a la gran carga orgánica que contienen. La Directiva 86/278/CEE regula las condiciones en las cuales los fangos pueden ser aplicados a los suelos agrícolas, con los factores correctores tendentes a impedir la contaminación de las aguas, la vegetación, la fauna, etc. La Directiva también prohíbe de manera explícita la aplicación a determinados cultivos y señala los tiempos establecidos para la aplicación.

La citada Directiva fue transpuesta al derecho interno español por el RD 1310/1990 y complementada por la Orden de 26 de octubre de 1993. En la actualidad la Dirección General XI de la CE ha realizado un estudio de modificación de la citada Directiva para transformarla en una norma mucho más restrictiva. En los borradores que circulan se aprecia la obligatoriedad del control de los metales pesados, unos límites de compuestos orgánicos que en la anterior directiva no se mencionaban y el posible control de algunos microorganismos patógenos. También hay que añadir que las inminentes restricciones a las actividades agrícolas se pueden ver compensadas por la potenciación de la aplicación al suelo en selvicultura. En contrapartida, si bien se legisla sobre la presencia de metales pesados en enmiendas orgánicas y adición a suelos, no contemplan hechos tales como la sobrefertilización inorgánica (NPK realizada por los agricultores) ni la capacidad bioacumuladora que cada cultivo desarrolla de manera específica.

En cualquier caso, de cara a la tipología de fangos urbanos procedentes de grandes ciudades con tejido industrial asociado, las posibilidades de aplicación al suelo cada día serán más limitadas. Seguidamente se resume un estudio llevado a cabo en Burgos (España), donde se analiza el efecto del cultivo de la cebada al ser abonada con fangos de EDAR (ver referencia bibliográfica).

El estudio consistió en el uso de fangos digeridos de EDAR como fertilizante orgánico para el cultivo de la cebada, cereal de gran incidencia en la alimentación animal y humana. El informe demuestra que se pueden encontrar ciertas ventajas ya que los biosólidos incorporan al suelo elementos esenciales como Fe, Cu, Mn y Zn en cantidades apreciables y susceptibles de permanecer en forma biodisponible incluso en condiciones adversas, como acontece con

muchos suelos españoles, según la naturaleza del mismo. Pero la parte más negativa es la aparición del alto riesgo químico y agrícola que supone la incorporación de metales pesados a la cebada, donde se ha demostrado que los metales se redistribuyen de manera no homogénea en el grano, gluma, tallo y raíz, lo cual conlleva claros riesgos sanitarios y edafoambientales.

El fango de la EDAR de Burgos usado en el experimento contenía la siguiente cantidad de metales pesados, en ppm: Pb 158, Ni 48, Mn 87, Fe 5.877, Cr 478, Zn 1.023, Al 9.892, Cd 5 y Cu 148. El estudio concluyó que en el grano se acumulan Cd y Cu, Fe, Cr, Cd y Cu en la espiga, en el tallo Cd y en la raíz Cr, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, Al, Fe y Mn.

La capacidad de bioacumular en la raíz de las plantas tal cantidad de metales alerta sobre la capacidad fitotóxica y la pérdida de fertilidad y productividad de los suelos a medio plazo. La bioacumulación de Cd y Cu en el grano es preocupante habida cuenta de que se trata de una materia prima en la industria alimentaria y en la producción animal. La práctica habitual de proporcionar como alimento a los rumiantes el rastrojo (pasto) como el tallo y la gluma (alimentación para ganado estabulado) es preocupante para la calidad de la carne, leche y vísceras de consumo humano. Todo ello justifica que la UE cada día restrinja más el uso de fangos de EDAR para estos usos.

Los plaguicidas, los disolventes industriales, los colorantes, los plastificantes, los agentes tensoactivos y muchas otras moléculas orgánicas complejas, generalmente de baja solubilidad en agua y elevada capacidad de adsorción, tienden a acumularse en los fangos. En los documentos de trabajo de la UE está en estudio fijar un valor mínimo para la aplicación al suelo del alquilobenceno sulfonato lineal (LAS) y ciertos patógenos, como los huevos de nematodos.

2.3.2. Potencial contaminante de los fangos de EDAR

Sólo para hacer una referencia a la potencial peligrosidad de los fangos de EDAR sin postratamiento, la Tabla 12.1 muestra una relación de los microorganismos patógenos más frecuentes así como de las enfermedades a que pueden dar lugar.

De hecho estos microorganismos se hallan presentes en las aguas residuales pero, con toda probabilidad, la inmensa mayor parte de ellos pasarán a los fangos, de ahí la necesidad de postratamiento.

Tabla 12.1. Organismos presentes en fangos y posibles enfermedades

Grupo	Género	Enfermedad
Bacterias	Salmonela	Tifus - Paratifus - Enteritis
	Shigella	Disenteria
	Escherichia	Enteritis
	Vibrio	Cólera - Paracólera - Enteritis
	Clostridium	Gangrena - Tétanos - Botulismo
	Leptospira	Leptospirosis
	Mycobacterium	Tuberculosos - Tuberculosis atípica
Virus	Poliovirus	Poliomelitis - Enteritis
	Coxackivirus A	Dolores cabeza y musculares
	Coxackivirus B	Náuseas - Meningitis
	Adenovirus	Fiebre - Infecciones respiratorias
		Enteritis - Conjuntivitis
		Afecciones nerviosas
	Rotavirus	Gastroenteritis infantil
	Reovirus	Gripe - Diarreas
	Hepatitis virus A	Hepatitis agudas o crónicas
Protozoos	Entamoeba	Disenteria amebiana
	Giarda	Amebiasis - Disenteria amebiana
Tremátodos	Schistosoma	Esquistosomiasis
Céstodes	Taenia	Tenia – Isticercosis
Nemátodos	Ascaris	Ascarisis
	Ancylostoma	Alquilostomiasis

2.3.3. El compostaje

Es otra vía de introducción de fangos al suelo, donde se obtiene un producto de mayor calidad y, normalmente, exento de gérmenes patógenos. Una definición actualizada y aceptada del proceso de compostaje es la siguiente: «Descomposición biológica y estabilización de un sustrato orgánico, bajo condiciones que permitan el desarrollo de temperaturas en el rango termófilo como resultado del proceso biológico aerobio exotérmico, para producir un producto final estable, libre de patógenos y semillas, y que pueda ser aplicado al suelo de forma beneficiosa». Este producto final estable y beneficioso para el suelo recibe el nombre de compost, y el sustrato orgánico o materia prima a la que se aplica el proceso puede ser cualquier residuo orgánico biodegradable.

Un tema con el que hay que tener mucha precaución en las plantas de compostaje es la generación de H_2S. El fango que llega a las plantas de compostaje

es húmedo y suele transportarse y almacenarse en tolvas (algunas veces se hace a granel o en pilas). En el interior de las tolvas se inicia un proceso anaerobio que culmina en la generación de H_2S, gas letal que hay que tratar con sumo cuidado. En algunas plantas ha habido episodios y accidentes muy graves relacionados con ello.

Con todo, el compostaje sigue siendo una salida válida, si bien a medio plazo habrá dos límites a su empleo masivo: el primero es de índole económica ya que cada vez es preciso introducir más medidas correctoras a dichas plantas, con lo que la inversión y la explotación resultan más caras. El segundo es de carácter ambiental y sanitario: igual que acontece con la aplicación al suelo, las cortapisas referentes a los contaminantes presentes en el fango van a ser más restrictivas.

Por las mismas razones expuestas en el apartado anterior, la UE está restringiendo cada día más la cantidad admisible de gérmenes patógenos y metales pesados en los fangos destinados a la fabricación de compost.

2.3.4. Los procesos de digestión y codigestión

Desde el punto de vista de la eliminación de residuos, en particular de fangos de EDAR, los procesos de digestión anaerobia, en la práctica, reducen poco la cantidad de materia entrante en el proceso, puesto que tan sólo una parte de la fracción orgánica se va a transformar en gas.

La descomposición anaerobia (en ausencia total de oxígeno) de la materia orgánica produce un gas combustible. Este gas contiene una alta proporción en metano con una potencia calorífica inferior notable, del orden de 5.000 kcal/m^3, y se designa usualmente como biogás. Todo proceso de digestión anaerobia lleva parejo una eliminación/depuración de la carga orgánica y la producción de este gas. Las instalaciones especialmente diseñadas para optimizar este proceso se designan como «digestores de metano», «plantas de biogás» o simplemente «digestores anaerobios».

La mayoría de las EDAR utilizan el proceso de fangos activados que consiste en un reactor biológico seguido de decantación. En la variante de aireación prolongada los tiempos de retención son muy elevados y el fango llega a la estabilización aerobiamente. En todos los demás casos, tanto los fangos extraídos del tratamiento primario como del secundario precisan de un tratamiento de digestión anaerobio antes de la deshidratación.

La digestión anaerobia de los fangos es el método más adecuado para obtener un producto aséptico. La descomposición de la materia orgánica por las bacterias se realiza en ausencia de aire con lo que el oxígeno necesario para el desarrollo de las bacterias lo obtienen con la recirculación de los propios fangos.

Desde el punto de vista estrictamente económico, la gran inversión en infraestructura que se requiere para un digestor pone en cuestión la rentabilidad económica del aprovechamiento energético del biogás, no obstante el impacto del olor queda prácticamente eliminado.

Una mejora digna de estudio es la codigestión. En el caso de los purines de cerdo, en el mejor de los casos, la máxima concentración de material seco puede alcanzar el 15%; lo normal en España es que sea del 2 al 8%. Además, el purín de cerdo presenta el inconveniente de su baja tasa de transformación en metano, lo que conduce a que este tipo de plantas sólo alcancen la rentabilidad si se mezcla el purín con otros residuos más energéticos. En ello se ha trabajado y se han logrado buenos resultados en la denominada codigestión. Esto es, la digestión de los purines con fangos de los mataderos o de otra procedencia que aseguren una gran cantidad de materia orgánica, en especial lípidos.

En el caso concreto de los fangos de EDAR se está trabajando bastante en la codigestión de los mismos junto a la fracción fermentable de los RSU. No obstante, al margen de la calidad de los fangos, la correcta valorización de la fracción sólida (la fracción fermentable) residual exigiría una recogida selectiva muy exigente de la fracción orgánica de los RSU.

2.4. LA VALORIZACIÓN DE LA FRACCIÓN INORGÁNICA

El tratamiento y valorización de la fracción inorgánica presente en el fango es la que condiciona, de hecho, la valorización del conjunto. Por ello vale la pena extenderse sobre este punto. Como pone de manifiesto el esquema de la Figura 12.1 esta valorización puede clasificarse en:

- *Procesos cerámicos.* Donde se pone tanto énfasis en la fracción orgánica como en la inorgánica. En ella hay que distinguir la fabricación de ladrillos y la de árido expandido.

- *Procesos energéticos.* Basados en potenciar la energía liberada por la fracción orgánica. Sin embargo en el caso de los fangos de EDAR no hay que olvidar que casi el 40% en peso es inorgánico (en el área de Barcelona es el 35%) y será preciso llevar a cabo procesos adicionales para inertizar la fracción inorgánica.

2.4.1. Los procesos cerámicos

La cerámica es una tecnología al alcance de cualquier país y/o industria que, debidamente conducida, es apta para el reciclaje de innumerables residuos.

La arcilla está formada por un conjunto de minerales heterogéneos entre los que destacan los minerales de arcilla propiamente dichos pero también hay gran cantidad de otros minerales que nada tienen que ver con la arcilla. Todo ello crea una cierta similitud con los minerales presentes en los fangos de EDAR. Por esta razón la fracción inorgánica de los fangos es compatible con la gran mayoría de las arcillas.

Los tipos de reacciones más destacadas que tienen lugar durante la cocción de las arcillas de interés cerámico son:

- Reacciones de vitrificación, o formación de abundante fase líquida, que a la salida del horno será una fase amorfa que habrá integrado a los metales pesados presentes o, si el tamaño de grano del residuo es considerable, lo encapsulará.
- Destilación de materiales orgánicos. Esta propiedad se usa para la generación de porosidad a partir de residuos orgánicos.
- Descomposición de los minerales arcillosos. Es la parte fundamental, ya que sin la presencia de los minerales de arcilla no existiría el proceso cerámico. Todos estos minerales, al llegar a cierta temperatura, rompen los enlaces del agua de constitución y se convierten en sustancias amorfas que, más adelante, iniciarán la formación de fase líquida.
- Descomposición de minerales no arcillosos, que casi siempre suelen estar presentes en la arcilla.

Cuando se somete una arcilla al calor éste provoca una creciente excitación de las estructuras cristalinas que se van transformando. La cocción es la última etapa del proceso cerámico y constituye una serie de procesos fisicoquímicos que se inician por reacciones en estado sólido.

A medida que aumenta la temperatura comienza la formación de la fase amorfa, como consecuencia del desmoronamiento de las estructuras cristalinas. Esta fase amorfa, que es líquida a elevada temperatura, es muy agresiva y conduce a un incremento de las reacciones. La fase líquida se va introduciendo en los intersticios de las micelas de arcilla y debido a la gran viscosidad, las va atrapando y englobando. Durante el proceso, el aire, o los gases procedentes de la conversión energética de la fracción orgánica de los fangos de EDAR, quedan ocluidos dando lugar a poros.

La ceramización, cuando se ha llevado a cabo correctamente, establece la frontera con la encapsulación que es el objetivo de toda una serie de procesos alternativos a la ceramización y, por tanto, del futuro comportamiento de un residuo confinado en el seno de un medio receptor. En pocas palabras: si el residuo entra a formar parte íntima, químicamente, del nuevo compuesto, el futuro comportamiento del conjunto será correcto y homogéneo, pero si el residuo es sólo retenido físicamente, sin cambio de estructura morfológica y/o química, quedará encapsulado y su futura evolución dependerá más del medio donde se halle que de su propia estabilidad y resistencia. En el primer caso se hablará de ceramización (y verdadera inertización) mientras que en el segundo escenario se deberá hablar de encapsulación. La Figura 12.2 muestra la secuencia de la ceramización, donde se intenta mostrar cómo la fracción inorgánica del fango puede sinterizar e integrarse en la matriz cerámica. En la misma se aprecia una primera etapa (A) donde las reacciones se inician en estado sólido (hay que imaginar que las partículas en blanco corresponden a micelas de arcilla y trozos de fango); más adelante (B) la fase amorfa, líquida a esta temperatura, se va agrandando; a mayor temperatura (C)

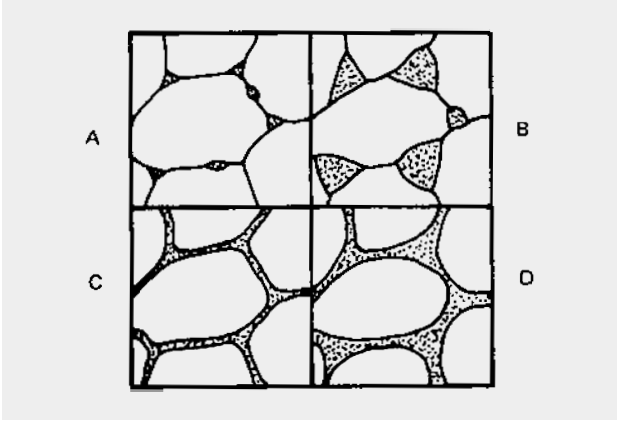


Figura 12.2. Principio de la ceramización.

la fase amorfa ya rodea las partículas sólidas procedentes de la propia arcilla. Si se incrementa la temperatura, y el sistema lo permite, la fase amorfa aumenta gracias a la fusión progresiva de las partículas originales (D). Este sería el estado ideal a alcanzar en el caso de la ceramización de fangos.

Todas las reacciones en estado sólido, como las cerámicas, presentan una cinética de reacción extremadamente lenta. El factor capaz de acelerar el proceso es el tamaño de grano: cuanto más fino sea el grano mayor superficie específica y mayor reaccionabilidad, y ello es un parámetro que juega a favor de los fangos de EDAR. Por el contrario, un grano de tamaño suficientemente grande queda sin reaccionar.

Cuando el objetivo perseguido es inertizar, por causa de su toxicidad, un contaminante inserto en un residuo, es preciso someterlo a una trituración fina. En este caso la fracción inorgánica del residuo funde parcialmente y se integra en la matriz cerámica. Si el tamaño de grano es grosero, la partícula de residuo no interacciona con la matriz cerámica y queda, simplemente, encapsulado. En esta tesitura si sufre un impacto mecánico fuerte o es atacado por un agente químico potente, se rompe el velo de protección y la carga contaminante es liberada al exterior.

Establecer la frontera donde el residuo se incorpora en la cerámica o queda encapsulado depende de otros factores, además de la distribución granulométrica, como, por ejemplo la reaccionabilidad de la arcilla y el propio residuo. Una frontera prudente sería un tamaño de 500 μm (0,5 mm.). Por encima de este tamaño el residuo queda encapsulado y por debajo se integra en la matriz cerámica.

En resumen, la cerámica abre una amplia gama de posibilidades para la valorización de los fangos. Sin embargo, como acontece con todas las técnicas aparentemente fáciles de aplicar, es preciso tener un conocimiento cerámico profundo así como de los posibles impactos ambientales que una mala gestión podría ocasionar.

2.4.1.1. La fabricación de ladrillos

El fango de EDAR es uno de los mejores ejemplos de aplicación de la cerámica a la valorización de residuos. El fango de EDAR deshidratado contiene por término medio un 70% de humedad y su fracción seca está compuesta por materia orgánica e inorgánica en proporciones que dependen del proceso de tratamiento a que haya sido sometido.

El uso directo del fango en la industria cerámica presenta ciertos problemas técnicos, por eso el Ecobrick© (proceso protegido por una patente internacional) mezcla el fango con residuo forestal. Éste absorbe parte de la humedad y hace posible que la mezcla sea menos plástica de manera que la amalgama se puede mezclar directamente con la arcilla.

Durante la cocción, los compuestos orgánicos del fango (celulosa, lignina, grasas, microorganismos patógenos, etc.) se destruyen y en su lugar se crean unos poros cerrados que darán lugar a propiedades de aislamiento térmico. Los componentes inorgánicos, arcillas, tierras, sales, metales pesados, etc., quedan insertados en la matriz vítrea del cuerpo cerámico y, por tanto, inertizados. En el caso de fangos con elevado contenido en metales, esta etapa es la más complicada. La integración de las fases minerales presentes en el fango sigue un proceso muy diferente al de los metales, de ahí que conseguir la correcta y segura integración de todos ellos en la matriz del silicato amorfo no sea una tarea fácil.

La primera propiedad a destacar es obviamente la capacidad de aislamiento térmico. La porosidad cerrada creada, tanto de gran tamaño como de reducido tamaño, crea un gran poder de aislamiento térmico. Tampoco es despreciable la resistencia mecánica. Si bien la resistencia mecánica y el aislamiento térmico son propiedades físicas contrapuestas, en el Ecobrick©, cuya fotografía muestra la Figura 12.3, se ha logrado un equilibrio entre ambas.

El proceso también se puede llevar a cabo a partir de fango deshidratado y seco como el que resulta de la instalación de un secado térmico.

Figura 12.3. El Ecobrick, ladrillo fabricado con fangos de EDAR.

2.4.1.2. Los áridos expandidos

Constituyen otra aplicación de la cerámica para la valorización de fangos de EDAR. El principio de funcionamiento consiste en mezclar el residuo con la arcilla, fabricar esferas de tamaño variable, que pueden oscilar entre los 5 y los 20 mm y, una vez secas introducirlas en el horno. Al estar el horno a alta temperatura el calor penetra en la masa cerámica y provoca la instantánea pirolización y gasificación de la materia orgánica. El gas generado, debido a la temperatura, aumenta de volumen y tiende a escapar. Si a la vez se consigue la vitrificación de la superficie, ésta se hace impermeable y se hincha debido a la presión que ejercen los gases.

El árido ligero es un material física y químicamente neutro, que no desprende gases ni malos olores, es imputrescible y no es atacable por parásitos, hongos o roedores. No le afectan las sustancias químicas y es altamente resistente a las heladas y a los cambios bruscos de temperaturas. La vitrificación superficial de la arcilla sella la porosidad abierta del cuerpo cerámico. Los gases al expandirse provocan una disminución de la densidad. Un agregado ligero bien diseñado debe flotar en agua (esta propiedad es indispensable para que pueda sustituir a los áridos convencionales en la formulación de hormigones). La Figura 12.4 muestra la foto de un árido expandido fabricado con residuos.

El árido es un cuerpo de geometría aproximadamente esférica, aspecto exterior liso y razonablemente impermeable. La fractura muestra un interior cavernoso y lleno de celdillas. Un hormigón convencional, con una resistencia típica de 200 kg/cm^2, tiene una densidad aparente de 2.500 kg/m^3. Sustituyendo el árido denso por uno ligero la densidad se reduce a 1.600 kg/m^3, manteniendo a efectos constructivos prácticamente la misma resistencia. Esto permite aligerar las estructuras portantes, construir edificios más altos y abaratar costes. Una buena aplicación de estos áridos consiste en la rehabilitación de antiguas cubiertas de fibrocemento, para lo cual se prepara un hormigón con árido ligero en lugar del denso convencional. Con esta medida se logran dos objetivos: conseguir un buen aislamiento térmico y eliminar el problema medioambiental que supone al fibrocemento en climas calurosos y secos.

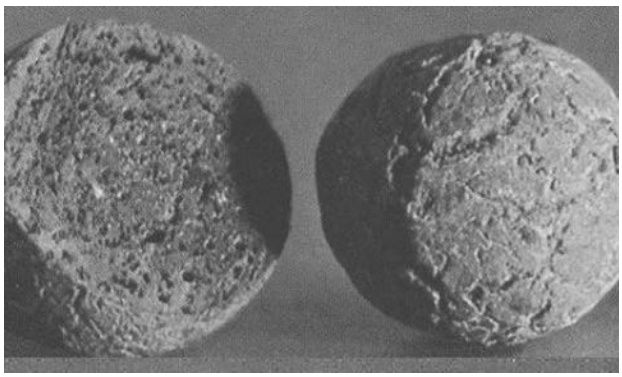


Figura 12.4. Árido expandido fabricado con residuos.

Desde el punto de vista de la seguridad, los hormigones fabricados con áridos ligeros conservan un 80% de la resistencia mecánica a temperaturas superiores a 600 ℃. A este factor hay que sumarle un mayor poder aislante, lo cual mejora todavía más sus cualidades frente al fuego (protección de estructuras metálicas). Así pues, el uso del árido expandido favorece al medio ambiente en varios frentes:

- No se extraen áridos de la naturaleza.
- Se valorizan los residuos fabricando áridos ligeros.
- Se propicia un ahorro de energía al aislar mejor los edificios.

2.4.2. Limitaciones de los procesos cerámicos

Todo el material que compone el fango típico de una EDAR puede ser perfectamente ceramizado, pero hay que tener en cuenta los siguientes factores limitantes:

- Desde el punto de vista del tratamiento e inertización de la fracción inorgánica de los fangos, la única limitación consiste en la emisión de compuestos clorados. Los cloruros presentes, abundantes en los fangos, se descomponen alrededor de 700 ℃ y liberan el ión cloruro que se incorpora a la corriente de gases.
- Durante el proceso de ceramización, el calor va penetrando al interior de la masa cerámica y va pirolizando la materia orgánica contenida en el fango. Más tarde, sobre los 750 ℃, la dilatación del material y las grietas provocadas por la salida de gases conduce a que sea parte del oxígeno de la atmósfera del horno el que penetre en el interior de la masa gasificando el resto de la materia orgánica, quedando parte de ella en forma de coque. Conceptualmente lo importante es comprender que la ceramización primero piroliza y luego gasifica, o sea, transforma toda la materia orgánica en gases combustibles que se oxidan posteriormente en el interior del horno.

- Todo el proceso de gasificación y liberación de gases pirolíticos acontece a baja temperatura, por tanto existe la posibilidad de que parte de los COV's salgan por la chimenea sin oxidar (la emisión de COV's es mucho más frecuente en la fabricación de ladrillos que en la del árido expandido). Esto, junto a la necesidad de abatir los gases ácidos, es lo que obliga a un tratamiento de los gases del proceso.

Puede aducirse que si bien el empleo de la tecnología cerámica supone una simplificación para el tratamiento de residuos que además significa una importante fuente de ingresos para los industriales cerámicos, el hecho de necesitar un registro de gestor de residuos les encarece y complica la gestión empresarial ya que deben instalar un sistema de tratamiento de gases; no obstante sigue siendo una práctica muy extendida en ciertos países de la UE. En alguno de ellos, con independencia del tratamiento de residuos, es obligación, en cerámicas y ladrilleras, tratar los gases antes de su vertido a la atmósfera.

2.4.3. Seguridad de los diferentes procesos cerámicos

Todo proceso de valorización en el que intervengan sustancias potencialmente contaminantes, como serían los «fangos sucios» de EDAR, hay que analizarlo bajo dos puntos de vista diferentes pero complementarios:

- La contaminación originada por el proceso de tratamiento elegido. Es decir, durante todo el proceso de valorización no se permite que se emitan metales, compuestos orgánicos, olores, etc.
- Los metales presentes deben quedar fijados en la matriz de tal manera que bajo ninguna circunstancia puedan salir al exterior.

La Figura 12.5 intenta reproducir los tres tipos de valorizaciones cerámicas que es posible aplicar a los fangos de EDAR. El esquema intenta reproducir la cantidad de fase amorfa que desarrolla cada uno de los procesos. Así, mientras en la vitrificación la fase amorfa es del 100%, en la clínquerización apenas alcanza un 15% y en la ceramización es variable en función del producto fabricado pero puede oscilar del 40 al 85%. En resumen, cuanto mayor sea el círculo, más seguridad.

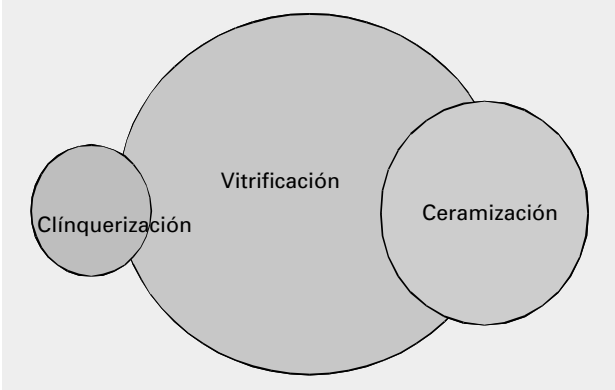


Figura 12.5. Seguridad en la valorizaciones cerámicas.

Es preciso señalar que las dos primeras, la clínquerización y la ceramización, admiten el fango entero, es decir fracción orgánica e inorgánica, mientras que la vitrificación está pensada tan sólo para la fracción inorgánica. La fracción orgánica desaparece en los procesos a alta temperatura, como acontece en todos los indicados, mientras que la inorgánica lo hace en líneas generales:

- En la clínquerización, las reacciones tienen lugar básicamente en estado sólido, sin intervención significativa de la fase amorfa. Ello equivale a decir que los óxidos metálicos difícilmente quedarán insertados en la matriz del clínquer, si bien algunos óxidos pueden quedar adheridos a la matriz.
- En la ceramización, los óxidos pasan a formar parte de la matriz cerámica. Se tratará pues de elegir un mineral de arcilla que cree fase amorfa a una temperatura inferior a la de volatilización de los diversos óxidos procedentes del fango.
- En la vitrificación todos los óxidos pasan a formar parte del vidrio.

En conclusión, de cara a la valorización de la fracción inorgánica del fango de EDAR, la tecnología más segura de inertización (sinónimo de irreversibilidad) es la vitrificación, seguida de la ceramización y, a mayor distancia, la clínquerización.

2.5. LA GESTIÓN DE LOS FANGOS DESDE EL PUNTO DE VISTA ENERGÉTICO

Existen muchos sistemas de conversión energética que son usados en la valorización de residuos. El objetivo de todos ellos estriba en romper las largas cadenas moleculares que, en el caso de los combus-

tibles residuales, suelen coincidir con las sustancias contaminantes, con el fin de eliminar la toxicidad y recuperar el calor contenido. Desde el punto de vista de las operaciones fundamentales de la física, estos procesos se pueden reducir de manera esquemática a cuatro, en función del agente responsable de la rotura del enlace:

- En la más conocida de ellas, la oxidación a alta temperatura, el calor generado por la reacción rompe las largas cadenas moleculares y excita los átomos hasta que éstos se combinan con el oxígeno. Las hay de media temperatura, baja temperatura, parcial (como la gasificación), catalítica, etc.
- La pirólisis podría considerarse un caso particular de la anterior, puesto que el mecanismo responsable de la rotura de enlaces es el calor, pero no hay presencia de oxígeno y ello supone que sea preciso la aportación de energía externa para desarrollar el proceso.
- En la hidrólisis el agente responsable es el agua. Con la ayuda del calor, el pH o la energía cinética existe una recombinación de sustancias.
- En la radiólisis, como la fotólisis, la energía procedente de la radiación es la responsable de la rotura de los enlaces.

La Figura 12.6 reproduce de manera esquemática los diversos procesos de conversión energética. La degradación de la materia orgánica es más o menos rápida según los parámetros que intervienen, que es lo que pretende esquematizar dicha figura:

- *Fermentaciones aerobias y anaerobias:* son las que tienen lugar en los vertederos. Es obvio que una parte de la materia orgánica, como el papel, es poco degradable y puede tardar años en transformarse; otros, como los plásticos, pueden demorarse todavía mas. En resumen, la opción del vertido es la menos favorable de cara a la tasa de conversión energética. Desde la óptica ambiental, al margen de la contaminación originada por los lixiviados, el efecto invernadero producido por el biogás es muy importante ya que el metano generado (50% en volumen) se emite directamente a la atmósfera. Teniendo en cuenta que la molécula de CH_4 tiene una capacidad de absorción del infrarrojo 21 veces superior al CO_2 (según la ta-

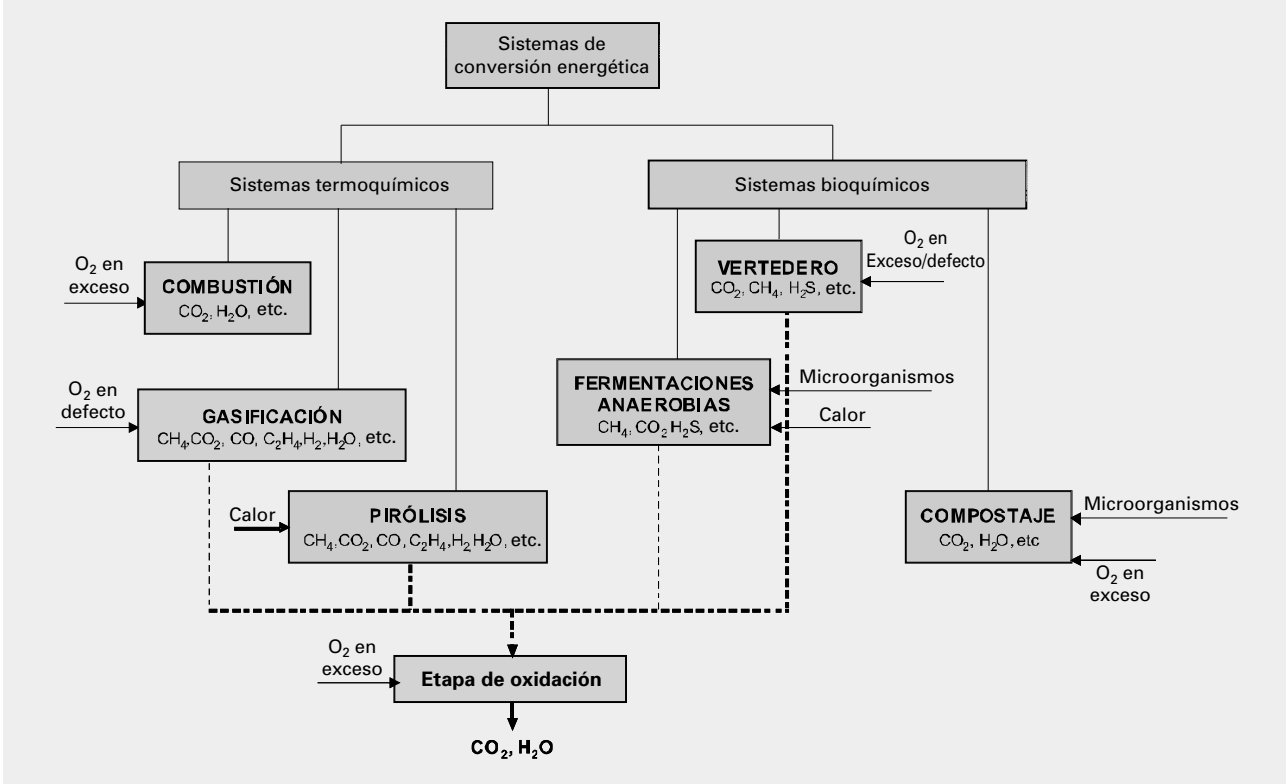


Figura 12.6. Conversiones energéticas en los fangos de EDAR.

bla de equivalencia de los «GEI» elaborada por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático), la incidencia sobre el efecto invernadero es muy importante. Esta es una de las causas de que sea obligado su tratamiento en los mismos vertederos.

- Únicamente *fermentaciones anaerobias*. En ellas lo que se persigue es la generación de forma controlada de biogás. Este biogás es mucho más rico que el procedente del vertedero (puede llegar a contener hasta un 70% de CH_4). Sin embargo, y a diferencia del caso anterior, el biogás se produce para ser oxidado y por tanto se reduce todo a CO_2 y H_2O. Desde el punto de vista de la tasa de retorno de la energía, estos procesos son lentos.
- *Pirólisis.* Donde el agente que desencadena la degradación es la temperatura. El gas obtenido es muy rico en términos de PCI, no obstante es un proceso endotérmico y se debe emplear parte de la energía resultante en ello. Por otro lado, genera una importante cantidad de coque, para lo que hay que recurrir a la incineración, o coincineración, para su eliminación.
- *Gasificación,* que es una combustión parcial de la materia en defecto de oxígeno, lo que da lugar a un gas combustible, gas de síntesis, de bajo poder calorífico.
- *Incineración o combustión con exceso de oxígeno.* Es el método más rápido de conversión energética y los productos finales son, únicamente, CO_2 y H_2O.

Hay que tener claro que el objetivo final de las conversiones energéticas es reducir la materia orgánica a CO_2 y H_2O. Los sistemas termoquímicos lo hacen a alta temperatura, directamente en el caso de la incineración o en dos etapas en el caso de la gasificación y pirólisis. Es decir, una vez obtenido el gas de síntesis es preciso oxidarlo.

La energía solar captada por las plantas es transformada mediante la fotosíntesis en energía química que se almacena en los compuestos que constituyen la materia de la que están formados los seres vivos. Así pues, se puede definir la biomasa (en la que se incluye, obviamente, los fangos de EDAR) como todo material con un origen biológico próximo.

El proceso fotosintético permite transformar el CO_2 y el H_2O en sustancias orgánicas, con liberación de O_2, de acuerdo con la reacción:

$$CO_2 + H_2O + \text{Energía Solar} \rightarrow (\text{H-COH}) + O_2$$

En el proceso inverso, en las diversas conversiones energéticas, la energía almacenada en la biomasa, que de manera simplificada puede representarse por la fórmula H-COH, libera calor. En el caso teórico de la combustión la reacción sería:

$$(\text{H-COH}) + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O + 4{,}65\ \text{kW}$$

El PCI de la biomasa es del orden de 4,65 kW (4.000 kcal/kg); tiene poco carbono y mucho oxígeno y compuestos volátiles, que aportan más del 60% del PCI. Si el objetivo es liberar la energía química contenida en el residuo orgánico (fracción orgánica de los fangos de EDAR), el proceso debe hacerse a una determinada velocidad para que tenga aplicación industrial. Siguiendo con el ejemplo propuesto de la biomasa, una unidad de ésta depositada en un vertedero se transformará en biogás en el transcurso de años (y no el 100%, ya que la lignina, parte integrante de la biomasa, no se degrada), mientras que en la incineración el proceso es instantáneo.

En los apartados siguientes, y por el mismo orden en que aparecen en la Figura 12.6, se procede a una ligera exposición de cada uno de los sistemas de conversión energética.

Desde el punto de vista de la gestión de los residuos conviene indicar que el único sistema finalista de tratamiento de la biomasa (fango) es la incineración. Todos los otros sistemas: vertido, digestores, pirólisis y gasificación, son procesos de conversión intermedios ya que el vector energético obtenido (gas) es preciso someterlo a otra operación para valorizarlo.

2.5.1. El vertido de fangos desde el punto de vista energético

El vertido no debería considerarse un sistema de conversión energética. Ha sido la Directiva 1999/31/CE, relativa al vertido de residuos, la que ha obligado a tratar y/o valorizar el gas de vertedero. No obstante, la misma Directiva impone serias restricciones al vertido de materiales orgánicos y fermentables en los vertederos, concluyendo con la prohibición, a corto y medio plazo (según el país de la UE) de esta práctica.

Desde el punto de vista de la conversión energética, los vertederos actúan como gigantescos reactores aerobios, en primera etapa, que no produce ener-

gía y anaerobios en segunda fase. Ello explica el por qué de la pobre tasa de conversión.

En el caso de los fangos de EDAR la cuestión todavía es más punzante: la ley prohíbe el vertido de materiales con un contenido en agua superior al 65%. Por otra parte, la presencia de agua es indispensable para activar y desarrollar la biodegradabilidad.

Existe algún país, como Suiza, que simplemente prohíbe el vertido de fangos, aunque sean secos, y en cualquier caso, hay que ser conscientes que la valorización energética del biogás es siempre un proceso muy lento.

2.5.2. La metanización de los fangos de EDAR

La metanización es una aplicación de la digestión anaerobia que consiste en transformar una parte de la fracción fermentable, o putrescible o degradable, de los residuos en gas metano para su posterior valorización.

Desde el punto de vista químico, en la digestión anaerobia se desarrollan gran cantidad de reacciones catalizadas cada una de ellas por enzimas específicos para dar compuestos intermedios distintos. En líneas generales se puede decir que durante la digestión la biomasa de partida, compuesta por moléculas complejas (proteínas, lípidos, hidratos de carbono, etc.), se descomponen en moléculas más simples, proceso que tiene lugar en las tres etapas clásicas, para dar como productos finales CH_4 y CO_2.

En función de la humedad se distingue entre:

- *Metanización húmeda.* Se debe añadir agua a los residuos hasta que el contenido de sólidos esté entre el 10 y el 15%. Esta modalidad es la usada para el tratamiento de fangos de EDAR.
- *Metanización seca.* El contenido de sólidos a la entrada del digestor oscila del 20 al 40%. La producción de gas es mayor por volumen de reactor.

Se considera que el ratio óptimo C/N ha de ser de 20-30. El tiempo de residencia depende de la tecnología usada, pero lo normal son 15 días.

En el caso de los fangos de EDAR, la digestión anaerobia ha pasado por dos fases históricas. El proceso tiene más de 100 años ya que a finales del siglo XIX se empleó en la Gran Bretaña como gas para la iluminación pública de algunas localidades. En tiempos recientes, la digestión en la fase primera se creía necesaria para la eliminación de los olores y generación de biogás para aliviar la carga energética de la EDAR. Sin embargo, los elevados costes de inversión unidos a la baja tasa de retorno energético, llevaron a los estrategas a la eliminación de los digestores en los diseños.

En plena etapa de los secados térmicos se ha demostrado que, en muchos casos, un fango digerido se comporta mucho mejor en la fase de secado y ocasiona menos problemas que otro sin digerir. Así pues, hay voces que abogan por su reimplantación.

Como todos los procesos de conversión energética de baja temperatura, los denominados biológicos en contraposición a los termoquímicos, las grandes inversiones precisas y la relativamente baja cantidad de biogás producido, obligan a un análisis profundo y en detalle de cada instalación antes de decidir la conveniencia de instalar un sistema de digestión.

Una variante del proceso es el que se emplea para la valorización energética de los residuos ganaderos. Las deyecciones ya contienen una cantidad importante de agua, puesto que se recogen conjuntamente las heces y los orines, a los que se añade el agua de limpieza de los establos. Un exceso de agua de limpieza, como es habitual en las explotaciones actuales, disminuye la concentración de sólidos hasta niveles cercanos al 1%, lo que hace inviable el proceso de digestión anaerobia, al menos desde el punto de vista económico. Sin embargo, este residuo o el procedente de la fracción fermentable de los RSU separados por sistemas hidráulicos, son un buen medio para potenciar la digestión de fangos de EDAR empleando la denominada codigestión.

Las variables operacionales, o comportamiento de un digestor, vienen marcados por:

- *Tiempo de residencia* (TRH). Ha de ser el suficiente para que las bacterias se multipliquen. El tiempo de doblado varía, en función del grupo de bacterias y de la temperatura, entre 3 y 20 días. Lo habitual es un tiempo entre 15 y 20 días. Con mucho control, el proceso se ha llegado a completar en 7 días. Desde el punto de vista técnico el TRH debe ser una función del destino del fango. Así, si el destino es el compostaje, el TRH ha de ser superior que si el destino es el vertido. En el caso de los fangos de EDAR, lo normal es alimentar el digestor con una mezcla de fangos primarios y secundarios.
- *Carga orgánica.* La carga orgánica (OLR) se define el cociente entre S_0 y TRH. S_0 es la concentración del fango, que depende de las

características del espesador. Las cargas utilizadas se sitúan en el intervalo de 3 a 7 kg SV/m^3 día. Así, a título de ejemplo: para una carga de 3,2 kg SV/m^3 día y un TRH de 10 días, se precisa una concentración de SV(sólidos volátiles) a la entrada del 3,2%. Ello implica una concentración de sólidos totales a la entrada de, aproximadamente, el 4,5%. En consecuencia, los sólidos del digestor secundario se deberían concentrar un 2% y los del primario un 7%.

- *Temperatura.* El control de temperatura en el digestor es un parámetro muy crítico. Por lo general se lleva a cabo mediante un intercambiador de calor externo. El calentamiento de realiza sobre el fango de entrada al que se le sigue añadiendo fango digerido. El intercambiador externo permite la inoculación del fango pero no es suficiente para la agitación. Algunos fabricantes emplean intercambiadores internos (tubos encamisados) a través de los cuales se bombea el fango.
- *Mezclado.* Más que la forma de llevar a cabo la mezcla es fundamental la calidad de los fangos mezclados.

La forma y diseño de los digestores es muy crítico:

- Por lo general los tanques son cilíndricos (diámetro de 6 a 40 m y altura de 6 a 15 m).
- Los fondos son inclinados.
- Las tapas pueden ser flotantes o incluso disponer de un gasómetro incorporado.
- El diseño oval es muy apropiado, pero caro. La razón es que la parte inferior se aprovecha para la reintroducción de gas y ello hace que el digestor no presente zonas muertas.

Por lo general la producción de biogás se sitúa en el intervalo:

0,75-1 m^3/kg SV tratado

En el DVD adjunto, en el punto 2, se muestra información complementaria sobre digestores anaerobios y procesos de metanización.

Si el fango digerido no sedimenta bien es debido a la flotación de los sólidos y a alta proporción de partículas finas. Los posibles problemas con la recirculación del sobrenadante tienen que ver con: olores, «*bulking*» del fango, incremento de la DQO y la adición de nutrientes.

La codigestión de fangos de EDAR con otros materiales supone un salto cualitativo importante para:

- Mejorar el rendimiento de los actuales digestores, que por lo general se hallan infrautilizados.
- En este sentido, la fracción fermentable de los RSU ofrece una solución digna de estudio. En este sentido son notables los ensayos llevados a cabo en la EDAR de Treviso (Italia), donde han logrado casi triplicar la producción de biogás.

Otro parámetro a tener en cuenta es el uso de los ultrasonidos, ya que rompen las paredes celulares, lo que transforma la materia orgánica en más asequible. Es decir, más degradable o digerible por parte de las bacterias. Con ello la generación de biogás aumenta en un 30%. Con la codigestión es relativamente fácil alcanzar la autonomía energética, por ejemplo, en plantas de tratamiento de deyecciones ganaderas.

2.5.3. La pirólisis de fangos de EDAR

La pirólisis es un tratamiento térmico, en ausencia de aire, de un compuesto orgánico para transformarlo en otros materiales más fáciles de tratar. Así pues, igual que la gasificación, no es tratamiento final sino una etapa intermedia. Un residuo sólido se transforma, según la caracterización y el nivel de temperatura, en una fracción gaseosa, otra líquida (en fase vapor a esta temperatura) y otra sólida (coque). La Tabla 12.2 indica la descomposición de los diferentes compuestos de materia orgánica.

La fracción gaseosa resultante del proceso está constituida por hidrógeno, monóxido de carbono, metano, etano y etileno, aunque su composición cuantitativa varía de forma muy sustancial con la temperatura de operación. Además, el porcentaje de metano depende mucho del contenido en humedad de la biomasa de partida. El poder calorífico del gas de pirólisis, muy superior al gas de síntesis procedente de la gasificación, oscila entre 3,8 y 15,9 MJ/m^3. Estos valores pueden aumentarse hasta 16,7-20,9 MJ/m^3 mediante una variante del proceso denominado pirólisis flash, que consiste en elevar fuertemente la temperatura de la biomasa a gran velocidad (unos 1.000 ℃ en 1 segundo), de forma que se produzca una pirólisis total (craqueo incluido), lo que evita la producción de alquitranes y mejora considerablemente el rendimiento del gas.

Tabla 12.2. Reacciones pirolíticas en función de la temperatura.

Rango de temperatura (°C)	Reacciones
100-120	Deshidratación, secado térmico.
250	Desoxidación, desulfuración. Explosión de la molécula orgánica generando agua y otros compuestos de carbono. Generación de sulfuros.
340	Rotura de los enlaces de los compuestos alifáticos produciendo metano y otros compuestos alifáticos más sencillos.
380	Carbonización. Fase de concentración del carbón en la materia más mineralizada.
400	Rotura de los enlaces carbono-oxígeno y carbono-nitrógeno.
400-600	Descomposición de los compuestos bituminosos en materiales de baja temperatura de carbonatación, como aceites y alquitranes.
600	Craqueo de materiales bituminosos en otros materiales resistentes a elevadas temperaturas (gases, hidrocarburos de cadena corta), formación de aromáticos (benceno y derivados).
> 600	«Aromatización térmica» del benceno a otros aromáticos más volátiles, reacción del etileno a ciclohexano, deshidrogenación de olefinas, etc.

El análisis termogravimétrico (TG) es una de las técnicas más apropiadas para entender la pérdida de peso en función de la temperatura (el TG determina la cantidad de volátiles generados, si bien no puede diferenciar si proceden de un carbohidrato o de un lípido). En el caso de los fangos de EDAR el proceso es particularmente complejo atendiendo a la diferente naturaleza de los componentes presentes. La ley cinética de descomposición de un compuesto S puede expresarse según la ecuación:

$$\frac{dw_s}{dt} = -k \cdot w_s^n$$

Donde w_s es la fracción másica no reaccionada a cualquier tiempo t, k es la constante cinética (la constante cinética con la temperatura sigue la ecuación de Arhenius) y n el orden de reacción. Por regla general, los fangos inician una pérdida de peso a partir de 200 ℃ que se prolonga hasta 600 ℃.

La inmensa mayoría de los fangos presentan un máximo de velocidad de descomposición entre 300 y 400 ℃, velocidad que empieza a disminuir a partir de 450 ℃. Por regla general, y de modo semejante a lo que acontece con la gasificación, los fangos se descomponen térmicamente en tres fracciones que, a su vez, corresponden a las siguientes fracciones:

- El primer grupo corresponde a la fracción biodegradable (incluyendo también los compuestos volátiles).
- La segunda fracción mayoritaria corresponde a macromoléculas orgánicas (celulosa, polisacáridos, grasas y proteínas) presentes en el fango original o procedentes de las células responsables de la digestión aerobia y anaerobia.
- Por último, la tercera fracción corresponde a material no biodegradable o difícilmente biodegradable.

En resumen, los fangos sin ningún tratamiento de digestión presentan pirólisis oxidativa (debido a la presencia de oxígeno en el propio fango) con aceleración de la descomposición en presencia de oxígeno. Los fangos con digestión anaerobia presentan también pirólisis oxidativa pero sin una gran aceleración de la descomposición debida al oxígeno. Además, muchos investigadores han coincidido en señalar que la presencia de pequeñas cantidades de sales inorgánicas afecta a los procesos de pirólisis.

En el caso de producción de combustibles líquidos y carbón, se requiere una alimentación con humedad baja y constante, para lo cual se realiza una desecación previa, utilizando los gases de la propia pirólisis. En este caso, el poder calorífico del combustible líquido oscila alrededor de los 25,1 MJ/kg, mientras que el del coque producido se encuentra sobre los 20,9 MJ/kg. En cuanto a rendimientos, se pueden llegar a obtener, por cada tonelada de biomasa seca, unos 225 kg de líquidos y 75 kg de coque.

En los últimos tiempos se está investigando mucho para transformar, mediante pirólisis, el fango en biocarburante. Sin embargo, para que el proceso resulte interesante desde el punto de vista industrial será preciso abordar antes una etapa de depuradoras de nuevo diseño para separar, antes de formarse los fangos, las diversas fracciones: grasas, proteínas, etc.

2.5.4. La gasificación de los fangos

La gasificación es un proceso térmico que convierte, mediante oxidación parcial a temperatura elevada, una materia combustible o residual en un gas de moderado poder calorífico.

En el DVD adjunto, en el punto 3, se muestra información sobre sistemas de gasificación de fangos.

Las combustiones, ya sean con defecto o con exceso de aire, son reacciones en estado gaseoso. De ahí que la gasificación tenga como finalidad convertir las sustancias combustibles sólidas en gaseosas, fácilmente transformables en energía por los sistemas convencionales.

La depuración y limpieza de los gases es imprescindible para su uso posterior. En el caso de empleo de biomasa y residuos, el tratamiento de gases después de la valorización energética es imprescindible y, de hecho, constituye la parte más crítica de la instalación.

Las etapas principales del proceso de gasificación, como indica la Figura 12.7, son:

- *Secado:* Evaporación de la humedad contenida en el fango.
- *Craqueo:* Degradación térmica en ausencia de oxígeno.
- *Gasificación:* Oxidación parcial de los productos de pirólisis.

El gas obtenido, llamado gas de síntesis, tiene un PCI moderado, sobre todo si el agente gasificante ha sido el aire; sin embargo, se puede oxidar perfectamente en una cámara de oxidación y valorizarlo en una caldera de vapor, o bien enfriarlo y, una vez depurado, valorizarlo en un motor de combustión interna.

En el caso específico de los fangos de EDAR, la mayoría de los reactores en servicio son de lecho fluidizado y los dos puntos más sobresalientes a tener en consideración son:

- La humedad del fango. La mayor parte de los sistemas de tratamiento se decantan por emplear fangos con una humedad próxima al 50%. La explicación estriba en el hecho de que siendo el fango de EDAR un combustible de notable PCI, la temperatura de trabajo va a ser alta, lo que complica el mantenimiento del árido que compone el reactor del lecho fluidizado. La evaporación del agua presente detrae un calor importante que mantiene la temperatura del árido dentro de los límites preestablecidos. El mantenimiento de la temperatura está directamente relacionada con la fusión de las escorias y con la volatilización de los compuestos de cloro.
- La cantidad de material inorgánico presente. Buena parte de él presenta un punto de fusión próximo a los 1.000 ℃, lo que condiciona la fluidificación y estabilidad del lecho.

2.5.5. La incineración de fangos de EDAR

La combustión se define como una oxidación rápida de la materia combustible con desprendimiento de calor. Así pues, se precisa, en primera instancia, que el residuo a oxidar tenga, al menos, uno de los tres únicos elementos susceptibles de combinarse con el oxígeno con liberación de calor: C, H y S.

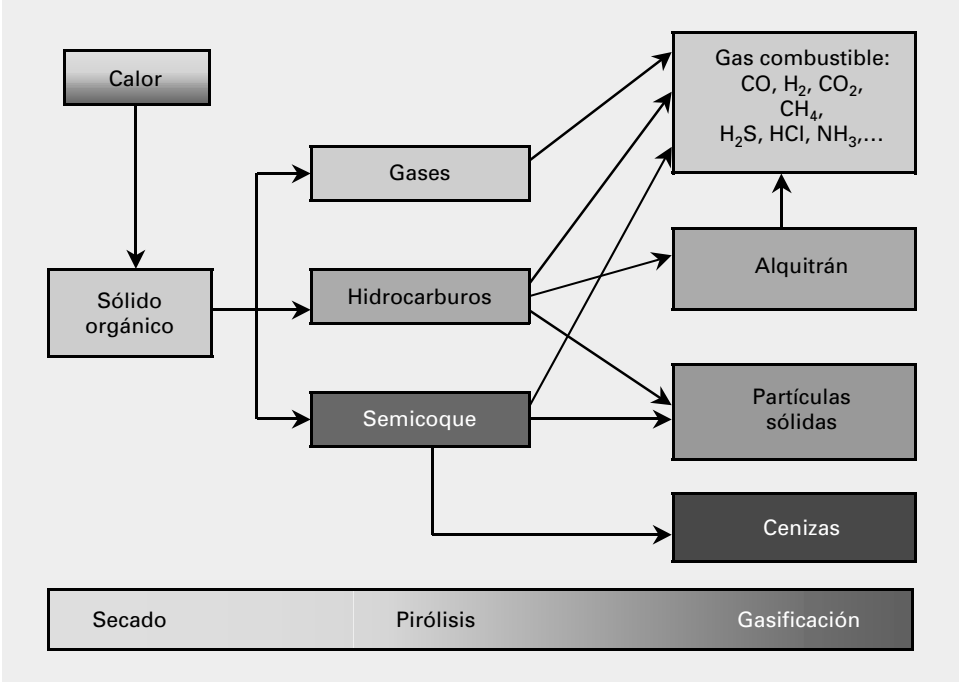


Figura 12.7. Etapas de la gasificación de la materia orgánica.

Otro factor indispensable es la mezcla íntima y adecuada del combustible (los volátiles) y el comburente, que suele ser aire. Seguidamente, cuando la mezcla es la correcta, se debe producir la ignición. A partir de este momento el calor generado permite mantener un nivel de temperatura que asegura la continuidad de la reacción.

Las reacciones de combustión pueden llevarse a cabo con el aire justo: reacción estequiométrica. Con exceso de aire hay oxígeno en los gases producto de la combustión (caso típico de la incineración). Con defecto de aire se detecta la presencia de inquemados (como acontece con la gasificación).

Esta tecnología es, con diferencia, la más usada para la conversión energética de residuos. En el caso específico de los fangos de EDAR, el sistema más empleado es la incineración en lecho fluidizado y hay que tener precaución en no rebasar los 900 ℃ en el lecho para evitar la fusión de algunos óxidos presentes.

2.6. LA EFICACIA DE LAS CONVERSIONES ENERGÉTICAS

Con el fin de concretar las opciones de conversión energéticas a partir de un fango de EDAR, la Tabla 12.3 muestra el análisis racional de un fango estándar.

Se define el análisis racional como el equivalente al análisis inmediato que se lleva a cabo en los combustibles convencionales, con la diferencia que se indica la naturaleza de los integrantes de la materia orgánica.

Tabla 12.3. Análisis elemental y racional de un fango estándar

CARACTERIZACIÓN DEL FANGO DE EDAR	
Análisis racional	**% peso**
Microorganismos	40%
Lignocelulósicos	10%
Grasas y aceites	15%
Inertes (cenizas)	35%
Análisis elemental	**% peso**
C	29,7%
H	3,8%
O	26,6%
Cenizas	34,6%
N	4,1%
S	0,9%
Cl	0,4%

Como complemento a la gama de tecnologías de tratamiento y valorización de residuos presentada en la Figura 12.6, se puede desarrollar un ejercicio teórico de conversión energética de los fangos de EDAR convencionales en electricidad.

Para ello se parte de un fango de EDAR convencional. En la primera columna de la Tabla 12.4 aparece el porcentaje de cada una de las fracciones que lo componen (en % peso), en la columna siguiente el PCI útil de cada fracción y en la última la energía aportada por cada una de ellas.

Tabla 12.4. Valor energético de cada componente del fango

PODER CALORÍFICO DEL FANGO			
	% peso	**PCI útil**	**kcal/kg**
Proteínas	28,0%	3.597	1.005
Carbohidratos	19,8%	3.449	684
Lípidos	7,1%	5.488	391
Fibras	10,2%	3.741	381
Inertes (cenizas)	35,0%	—	—
Total	100,1%		2.461

A partir de estos datos se puede elaborar la Tabla 12.5 teniendo en cuenta las siguientes premisas:

- *Vertedero:* Para calcular la energía útil disponible se parte de la base de que se aprovechará energéticamente el 80% de la fracción fermentable y cerca del 20% de los residuos de naturaleza celulósica, ya que con el tiempo se hidrolizarán y fermentarán, transformándose en biogás.
- *Fermentación anaerobia:* Se supone que en la etapa de hidrólisis previa, cerca de un 25% del papel y los textiles se degradarán y serán enviados al reactor de metanización. El biogás generado se valorizará en un motor de cogeneración.
- *Pirólisis:* Puesto que se trata de un proceso endotérmico, se emplea una cantidad del gas generado para aportar dicho calor. Por otra parte, el coque producido, que puede representar hasta un 35% en términos de masa y un 30% en términos de energía no computa para la producción de energía eléctrica puesto que se trata de un sólido. En el presente ejercicio se parte de la base de que el gas de pirólisis se valorizará energéticamente de la misma manera que se realiza con un gas de síntesis. El menor rendimiento de transformación obedece al hecho de que el gas de pirólisis es mucho más rico en hidrocarburos

condensables que el gas de síntesis y, durante el enfriamiento se «perderán» desde el punto de vista energético, ya que los hidrocarburos condensados pasarán a las aguas de proceso.

- *Gasificación:* El residuo debe pretratarse (habitualmente se clasifica y se peletiza) lo que consume una cierta energía. El gas de síntesis se enfría en una torre, lo que representa la pérdida del calor sensible de los gases, pero la parte más importante es la pérdida del calor latente de los vapores presentes (hidrocarburos condensables) puesto que en fase líquida se transfieren al agua de refrigeración, lo que supone una gran pérdida desde el punto de vista energético. Por otra parte se debe emplear energía para refrigerar el agua de proceso y para accionar la depuradora de las aguas de proceso. Como contrapartida, la valorización del gas de síntesis en un motor de combustión interna (ciclo Otto) presenta un elevado ratio de transformación. Como muestra la Tabla 12.5, la gasificación supone la opción que proporciona un mejor ratio de conversión. Sin embargo, hay que indicar que en algunas instalaciones es muy complicado valorizar el gas de síntesis en un motor y se opta por oxidarlo en una caldera con lo que el rendimiento final es el mismo que el de una incineración.
- *Incineración:* Toda la fracción orgánica se oxida. El calor sensible de los gases resultantes se recupera en una caldera de vapor, donde se expande en una turbina que sigue un ciclo clásico de Rankine, con un ratio de transformación del PCI del combustible a kW(e) en bornes del transformador de aproximadamente el 20%.

Con estas acotaciones se ha confeccionado la Tabla 12.5, donde en la primera columna se indica la energía disponible en el proceso, en la columna siguiente aparece el porcentaje de conversión energética (PCI del combustible a kW (e) en bornes del alternador) y, finalmente, la última columna expone la tasa de conversión, en kW (e) a que da lugar cada unidad de fango de acuerdo con el sistema de valorización energético utilizado.

Tabla 12.5. Rendimientos de las conversiones energéticas (base seca).

VALORES Y RENDIMIENTOS ENERGÉTICOS (fango seco)			
Proceso	**kW disponible**	**Rendimiento total (%)**	**kW(e)/kg fango (bs)**
Incineración	2,96	20,0%	0,59
Gasificación	2,96	23,7%	0,70
Pirólisos	2,96	11,6%	0,34
Fermentación anaeróbica	2,16	38,0%	0,82
Vertedero	1,37	24,7%	0,34

Básicamente, de acuerdo con la Tabla 12.5, los sistemas de valorización energética pueden clasificarse en dos tipos:

- Los que siguen el ciclo Rankine, como la incineración.
- Los que valorizan el gas en un motor de cogeneración, ya sea directamente, como los biológicos, o bien previo lavado como en las versiones de pirólisis y gasificación.

A la vista de los resultados obtenidos cabe resaltar una puntualización fundamental. La Tabla 12.5 apunta un ejercicio teórico en igualdad de condiciones, escenario imposible, ya que sobre fango seco las opciones bioquímicas serían imposibles. Además, se deben añadir las siguientes observaciones:

- A igualdad de propiedades del fango, el rendimiento más elevado se obtiene en la digestión anaerobia seguida de la gasificación; sin embargo, hay que indicar que esta modalidad obliga a un pretratamiento que encarece el proceso. Por otra parte, las etapas de tratamiento y lavado de gases son muy críticas.
- La pirólisis es el sistema que presenta menor rendimiento de los denominados «sistemas termoquímicos». En primer lugar por la generación de coque y, en segundo lugar debido a que la cantidad de hidrocarburos condensables es más elevado que en el caso del gas de síntesis. Además, el lavado de gases es tan crítico como el caso de la gasificación, por lo que, de cara a la conversión energética, es aconsejable valorizar este gas en una cámara de oxidación.
- El caso del vertido es, en términos energéticos, pobre ya que se supone que la gran mayoría de la celulosa presente no se va a degradar y, por tanto, no podrá ser valorizada por este sistema.

A medida que varía la caracterización de los fangos, los valores obtenidos se mantienen aproximadamente proporcionales. Así, la Tabla 12.6 propone unas variaciones en las partidas integrantes de los fangos de manera que el PCI vaya en aumento. La tasa de conversión energética sigue una evolución

Tabla 12.6. Evolución de los parámetros de un fango de EDAR.

HIPÓTESIS DE CARACTERIZACIÓN DEL FANGO (fracción seca)				
Microorganismos	25%	30%	40%	50%
Grasas y aceites	20%	20%	25%	30%
Lignocelulósicos	10%	15%	10%	10%
Inertes	45%	35%	25%	15%
PCI (kw/kg)	3,06	3,41	3,94	4,70
RESULTADOS kw(e)/kg fango				
Incineración	0,61	0,68	0,79	0,94
Gasificación	0,76	0,85	0,98	1,17
Pirólisos	0,36	0,41	0,49	0,60
Fermentación anaeróbica	0,83	0,89	1,10	1,33
Vertedero	0,35	0,37	0,46	0,55

paralela ya que, en definitiva, el parámetro más importante es el poder calorífico.

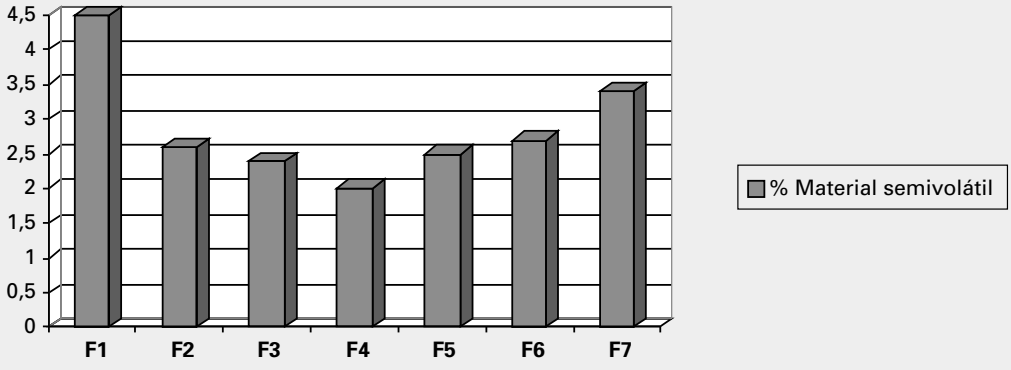
Como conclusión hay que anotar que si bien la digestión anaerobia es el sistema de conversión energética que presenta un mejor ratio de conversión, no se han valorado, hasta ahora, ni el factor humedad ni el tiempo de proceso. La digestión anaerobia de la materia precisa semanas (el vertedero incluso años), mientras que los sistemas termoquímicos son instantáneos. Más adelante se tienen en cuenta estos parámetros, en particular la humedad, y los resultados cambian sustancialmente, otorgando el primer lugar a la gasificación y el segundo a la incineración.

2.7. LOS PROCESOS ENERGÉTICOS Y LA CONTAMINACIÓN

El objetivo genérico de los tratamientos de fangos es eliminar, reducir y/o neutralizar la potencial toxicidad. Ésta es directamente proporcional a la calidad del agua residual, a partir de la cual se generará el fango, y el sistema de postratamiento elegido. La Figura 12.8 muestra la pérdida de volátiles en diversos fangos según el tratamiento del agua residual y del propio fango. Como era de esperar, en el caso de que el proceso no disponga de ningún tipo de fase aerobia o anaerobia la cantidad de material semivolátil en el fango será mayor.

En el caso de un proceso de pirólisis de fangos, los compuestos volátiles pueden clasificarse en:

- Compuestos volátiles ligeros (gases): metano, etano, propileno, propano, etileno, benceno y 1,3-butadieno, etc.
- Los compuestos semivolátiles a que hace referencia la Figura 12.8, son: estireno, benzonitrilo, propinil benceno, naftaleno, benzoacetonitrilo, fenantreno, etc. A la temperatura de trabajo, la mayoría de estos compuestos se hallan en fase vapor y, al reducir la temperatura, condensan y forman los denominados aceites o líquidos pirolíticos. Todos estos compuestos tienen naturaleza aromática, con los peligros que puede entrañar su manipulación.



Tipo de fango	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
Tratamiento del agua residual	Fisicoquímico. Sedimentación primaria	Fangos activados	Fisicoquímico + fangos activados	Fisicoquímico + fangos activados	Fisicoquímico + fangos activados	Fangos activados	Físico/químico
Tratamiento del fango	Deshidratación mecánica	Digestión anaerobia + deshidratación mecánica	Digestión anaerobia + deshidratación mecánica	Digestión anaerobia + deshidratación mecánica	Digestión anaerobia + deshidratación mecánica	Digestión anaerobia + deshidratación mecánica	Deshidratación química + deshidratación mecánica

Figura 12.8. Presencia/pérdida de materia semivolátil según tratamiento.

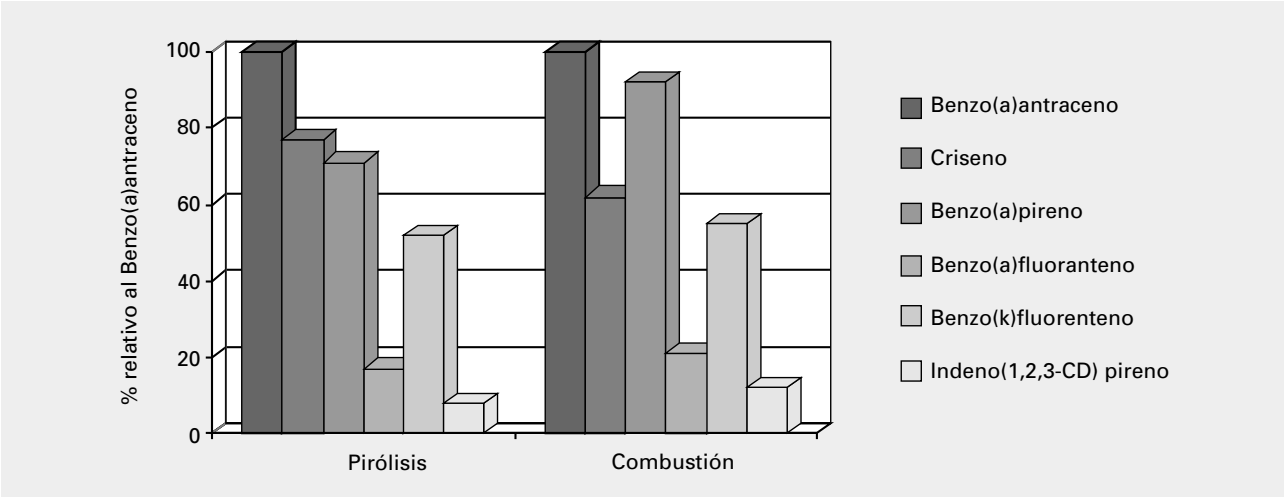


Figura 12.9. Compuestos aromáticos creados en la oxidación.

La Figura 12.9 muestra la presencia de nuevos compuestos generados en la combustión y en la pirólisis de fangos de EDAR.

Es evidente que el fango no contenía ninguno de los hidrocarburos aromáticos, todos ellos de carácter cancerígeno, antes de la entrada al proceso térmico; sin embargo, tanto durante el proceso de pirólisis como en el de incineración (y lo mismo acontecería con la gasificación) se han generado unos compuestos peligrosos que será preciso degradar y oxidar en la cámara de postcombustión.

Como es sabido, la pirólisis, como la gasificación, es un proceso intermedio. Es decir, los gases o vapores que generan han de ser sometidos a una siguiente etapa de oxidación para su destrucción y valorización energética. Es precisamente en este punto, generación de semivolátiles, donde cobra relevancia el lavado de gases para el caso de la valorización del gas de síntesis en motores o turbinas, y la cámara de postcombustión en el caso de una valorización energética para la obtención de calor.

Otro parámetro que afecta directamente al tratamiento de fangos de EDAR es la presencia de nitrógeno. Este elemento suele encontrarse en dos formas:

- Nitrógeno en la estructura del anillo aromático: metil piridina, fenil piridina, quinolina, isoquinolina, etc.
- Nitrógeno formando enlace triple con el carbono (grupos nitrilo): benzonitrilo, metilbenzonitrilo, naftalenoacetonitrilo, fluorencarbonitrilo, etc.

2.7.1. La cloración

El cloro es un elemento común y presente en los fangos de EDAR. Su presencia da lugar a las reacciones de cloración que, para el caso del benceno, pueden clasificarse en:

- Cloración directa: $C_6H_6 + Cl_2 \rightarrow C_6H_5Cl + HCl$.
- Oxicloración: $C_6H_6 + HCl + {}^1/_2\, O_2 \rightarrow C_6H_5Cl + H_2O$.

Estas reacciones se ven catalizadas por la presencia de sales de cobre (en particular se ha estudiado el caso del $CuCl_2$) o de cobre, elemento frecuente en los fangos y en el agua en general. Además, el efecto se ve incrementado con la temperatura. Estas reacciones son complejas y también aparece el diclorofenol, uno de los precusores de los PCDD/Fs (dioxinas y furanos). El máximo rendimiento de estas reacciones tiene lugar sobre los 500 ℃.

Por todo ello, tanto por la formación de compuestos aromáticos como organoclorados, es fundamental la adición de carbón activo para evitar su emisión al exterior.

3. La generación de fangos de EDAR

En el caso de las aguas residuales urbanas el diseño de las EDAR es prudente realizarlo para una ratio de 100 g MS/h · d, esto es 100 gramos de materia seca en suspensión por habitante y día. La ACA usa el valor de 90 g MS/h · d. Esta cifra equivale a 0,4 kg/h · d en forma de fango al 75% de humedad. Si además se tienen en cuenta las aguas industriales, que una vez pretratadas también van a la EDAR, y la adición de estabilizantes, la cantidad total de fangos se acerca a 0,8 kg/h · d, de ahí la importancia del problema. En otras palabras, su cuantía se acerca a los RSU (residuos sólidos urbanos).

Desde el punto de vista ambiental es preciso añadir el problema de la caracterización de ciertos contaminantes tanto de naturaleza orgánica como inorgánica, lo que conduce a que muchos de los fangos generados no tengan más vía de tratamiento que su valorización energética.

Partiendo de la base de que la depuración de las aguas residuales supone, aproximadamente, 40 kg/hab y año (110 gMS/hab y día), España se halla alrededor del 70% de la depuración total, puesto que en 2004, según el Ministerio de Medio Ambiente, alcanzó los 27 kg/hab y año. La Figura 12.10 muestra las cantidades totales de aguas depuradas en algunos países de la UE, así como el destino de los fangos producidos.

3.1. GENERACIÓN DE FANGOS POR COMUNIDADES AUTÓNOMAS

Uno de los grandes problemas que plantean los estudios ambientales referentes a la producción de fangos es la escasez de datos fiables respecto al proceso de generación. Con todo, la Tabla 12.7 muestra en la primera columna las cifras oficiales de producción de fangos ofrecidas por las diversas comunidades autónomas de España, en tMS/año. En la columna siguiente aparecen los datos teóricos de producción si se alcanzaran los parámetros antes citados de 40 kg/hab y año (110 gMS/hab y día), y la última columna indica el porcentaje teórico de aguas residuales tratadas. Las cifras de población están referidas a 1 de enero de 2005, según el Instituto Nacional de Estadística.

Como se observa, los valores generales concuerdan bien con los indicados en la Figura 12.10.

3.2. DESTINO DE LOS FANGOS

La Figura 12.10 muestra también la tendencia del destino de los fangos en los diversos países de la UE. Esta se puede sintetizar en:

- La tendencia, en los países más industrializados, apunta a un incremento de la valorización energética.

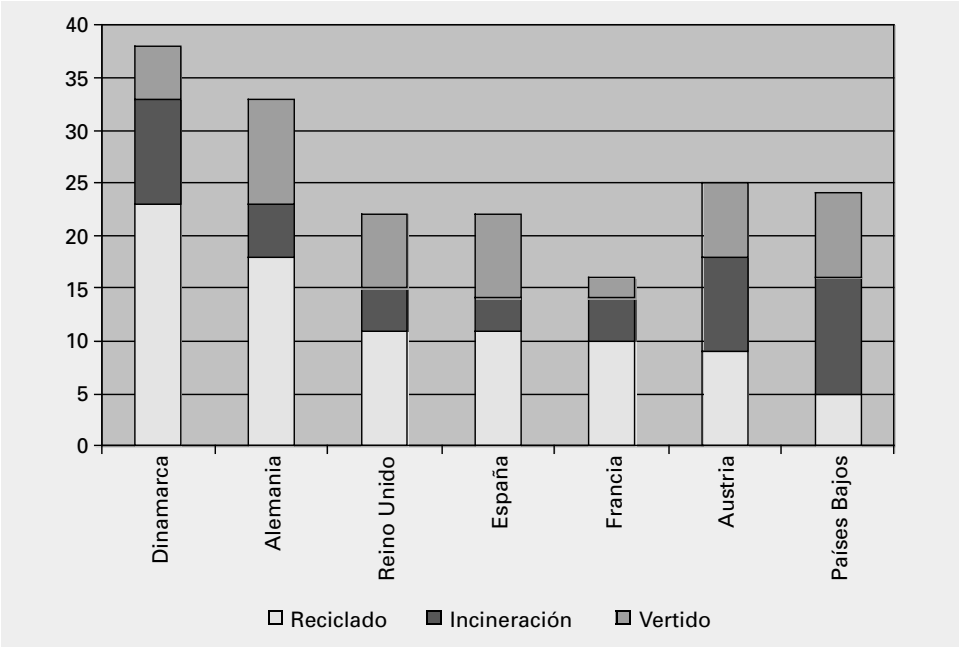


Figura 12.10. Generación de fangos, kg/hab y año, en algunos países de la UE.

Tabla 12.7. Producción de fangos de EDAR por Comunidades Autónomas (España) (2005).

GENERACIÓN DE FANGOS POR COMUNIDADES				
	Generados t MS/año	Habitantes	Teóricos t MS/año	Depuración %
Andalucía	302.500	7.849.799	313.992	96
Aragón	41.000	1.269.027	50.761	81
Asturias	36.000	1.076.635	43.065	84
Canarias	54.000	1.968.280	78.731	69
Cantabria	18.000	562.309	22.492	80
Castilla y León	81.000	2.510.849	100.434	81
Castilla-La Mancha	56.000	1.894.667	279.808	20
Cataluña	200.000	6.995.206	279.808	71
Ceuta	1.200	75.276	3.011	40
C. Valenciana	130.000	4.692.449	187.698	69
Extremadura	36.000	1.083.879	43,355	83
Galicia	90.000	2.762.198	110.488	81
Islas Baleares	29.000	983.131	39.325	74
La Rioja	8.000	301.084	12.043	66
Madrid	220.000	5.964.143	238.566	92
Melilla	1.100	65.488	2.620	42
Murcia	37.000	1.335.792	53.432	69
Navarra	11.320	593.472	23.739	48
País Vasco	63.000	2.124.846	84.994	74
Total	1.415.120	44.108.530	1.968.363	72

- En algunos países, como Austria y Suiza, el vertido de fangos está prohibido. Ello surge como consecuencia del avance de la Directiva sobre vertido (1999/31/CE) que restringe la posibilidad de eliminación en vertederos de residuos biodegradables y prohíbe el vertido de residuos que no hayan sido sometidos previamente a tratamiento.

La evolución histórica en el destino de los fangos de EDAR en España queda reflejado en la Figura 12.11.

Vale la pena hacer unos comentarios a la figura anterior. La parte más importante se destina a reciclado. Bajo esta denominación se integra el vertido directo al terreno (sistema mayoritario) y la fabricación de compost, mientras que la incineración, que cuando se recupera energía debe considerarse como una opción de valorización, se clasifica aparte y ocupa la última posición, incluso por detrás de los vertidos incontrolados.

Según datos proporcionados por la ACA (*Agència Catalana de l'Aigua*), perteneciente al Departamento de Medio Ambiente del Gobierno Autónomo Catalán, la generación de fangos en Cataluña en 2005 fue algo superior a 150.000 t(MS). El destino de los fangos en 2005 se representa en la Figura 12.12.

Siguiendo las indicaciones de las directivas europeas y del Plan Nacional de Lodos, los fangos depositados en vertederos controlados han tenido que disminuir en un 20% a partir de 2007.

En la Figura 12.12, y siguiendo con la problemática constreñida al territorio catalán, el término «aplicación al suelo» es, como en el resto del estado español, la partida más importante y vale la pena dedicarle unos comentarios, ya que la definición hace referencia a:

- *Agricultura de producción*, actividad cada vez más vigilada y restringida, teniendo en cuenta la naturaleza de los fangos. En ocasiones la aplicación es directa, mientras que otras veces se efectúa después de un compostaje.
- *Restauración del suelo*. Esta actividad no se ve afectada en demasía por la calidad de los fan-

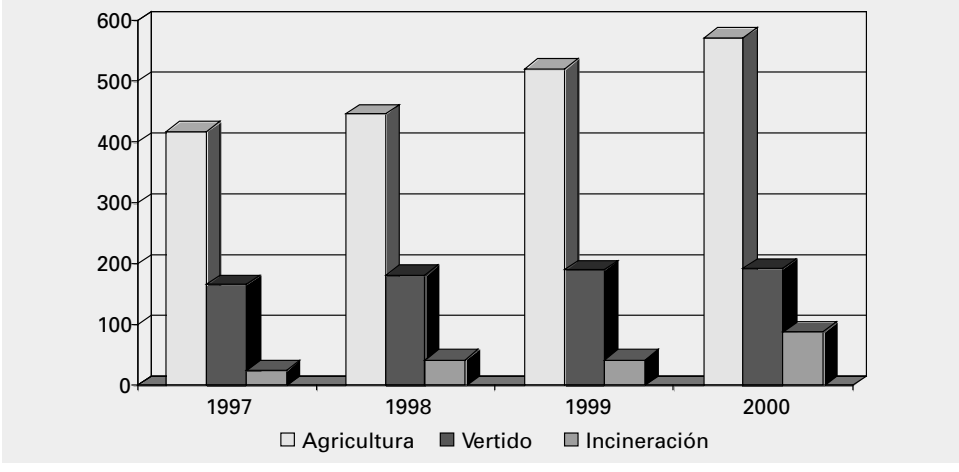


Figura 12.11. Evolución histórica del destino de fangos de EDAR en España.

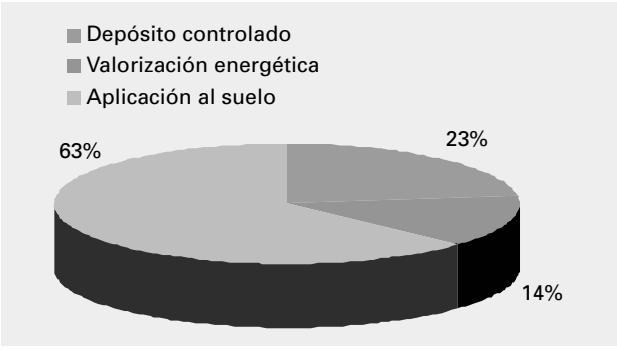


Figura 12.12. Destino previsto de los fangos de EDAR en Cataluña en el año 2005.

gos, aunque sí depende de la propia dinámica de la restauración, ya que la fracción orgánica del fango puede generar inestabilidad mecánica. Tampoco se sabe con certeza qué puede acontecer con los lixiviados a largo plazo.

- *Jardinería*. Aceptable, si bien estas posibilidades son muy limitadas.
- *Obra pública*. En este caso es necesario un estudio detallado para cada aplicación.
- *Canteras*. Como en el caso de la restauración del suelo, se trata de una actividad que puede quedar afectada por la calidad intrínseca del fango.

3.3. EVOLUCIÓN DE LA GESTIÓN DE FANGOS EN LA UE

En la Figura 12.13 se puede observar la evolución del tipo de gestión de los fangos en la Unión Europea, así como el incremento en su generación.

Sin entrar a valorar detalladamente los resultados expuestos en la Figura 12.13, sí conviene indicar que la valorización energética mediante incineración con generación de electricidad ha aumentado significativamente.

3.3.1. Comparación de las vías de gestión de fangos en la UE y Cataluña

La gráfica expuesta en la Figura 12.14 muestra la contribución, en porcentaje, de cada tipo de gestión de fangos de EDAR en la Unión Europea y Cataluña. Dicha gráfica se ha elaborado a partir de los resultados de la Figura 12.13, refiriendo los datos al año 2005.

En la Figura 12.14 se muestra claramente la tendencia en la gestión de fangos. En la Unión Europea la valorización energética se incrementa en detrimento del sistema mayoritario, la aplicación al suelo. Pero si se tiene en cuenta la disminución relativa de la opción del vertido, la valorización energética aumentará significativamente en los próximos años.

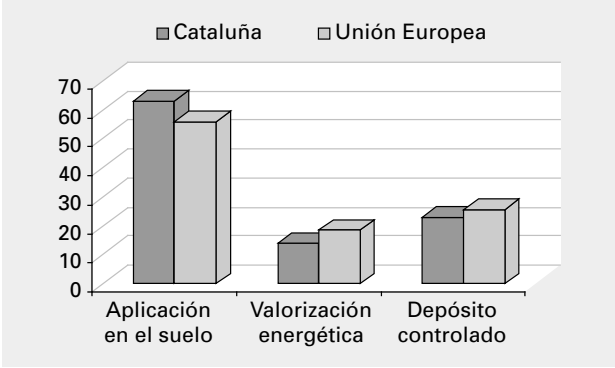


Figura 12.14. Comparación de los diferentes sistemas de gestión de fangos en la UE y en Cataluña (2005).

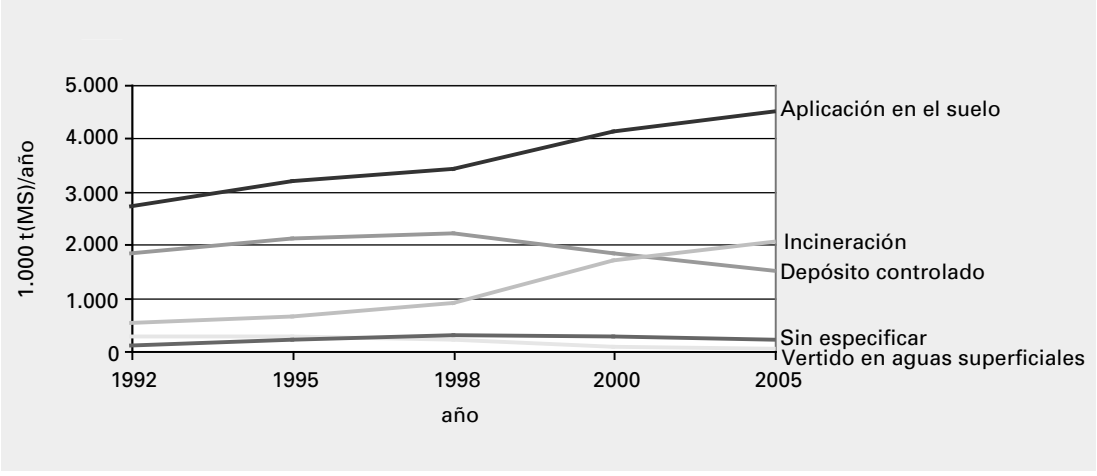


Figura 12.13. Evolución de los diferentes tipos de gestión de fangos en la UE.

En la Figura 12.15 se expone la cantidad de fangos que se incineraron en diversos países de la Unión Europea en el año 2003.

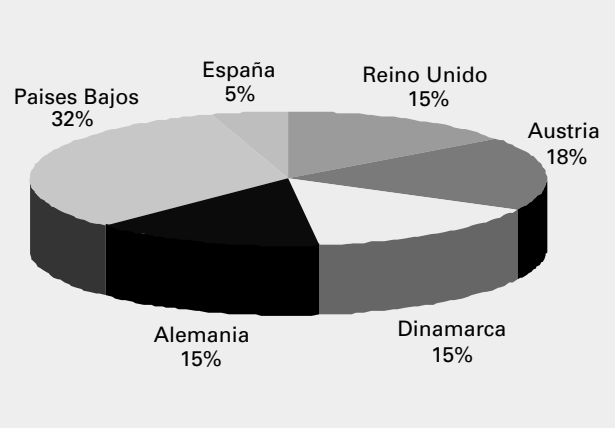


Figura 12.15. Porcentaje de incineración de fangos de EDAR en diversos países de la UE en el año 2003.

De la Figura 12.15 vale la pena destacar que en países que por motivos de densidad demográfica y orografía se parecen a Cataluña, como Austria y los Países Bajos, la tasa de conversión energética de los fangos es mucho más importante.

Si bien Cataluña es una de las comunidades que más depura las aguas residuales, conviene recordar que tomando la cifra estándar de 110 g MS/habitante y año (en forma de fangos), para una población estimada de 7.000.000 habitantes, la cifra global de fangos debería ser de 280.000 t(MS), lo que hace suponer que la generación de fangos deberá incrementarse de manera importante en un futuro próximo.

Conviene indicar que las depuradoras industriales son las primeras generadoras de fangos en Cataluña. Las vías de tratamiento de estos fangos no difieren demasiado de la de los fangos urbanos: el 65% se destina a aplicación al suelo, mientras que el 35% se gestiona en vertederos.

4. Caracterización de fangos de EDAR

Por regla general la fracción seca del fango de EDAR suele tener un 55-60% de materia orgánica y el resto de inorgánica. La Figura 12.16 quiere simbolizar esta simple caracterización (fango húmedo 100%, compuesto por un 77% de agua y un 23% de materia sólida: orgánica e inorgánica. Es decir, un 23% de sequedad).

La caracterización aquí descrita sólo hace referencia a la mezcla de componentes que condicionan las propiedades físicas y químicas. Todo ello en función del tratamiento dispensado, puede complicar la posterior valorización.

El fango seco, el que sale de las plantas de secado térmico, suele contener entre un 8 y un 15% de humedad. En líneas generales, la estructura de la materia orgánica (MO) condiciona el secado, mientras que la naturaleza de la fracción inorgánica (MI) condiciona las posibilidades y los sistemas de valorización.

Figura 12.16. Comparación de la estructura del fango húmedo y del fango seco.

Por lo que hace referencia al secado, los materiales de naturaleza inorgánica son más fáciles de secar puesto que la red capilar es muy primitiva y el agua puede fluir fácilmente a la superficie. Por este motivo la cantidad de agua contenida en los lodos inorgánicos no suele ser muy grande. En los materiales de estructura orgánica y en particular los de naturaleza higroscópica, como los fangos de EDAR, la red capilar es muy extensa y el agua es difícil de extraer puesto que está retenida por fuerzas de adsorción u osmóticas; por ello estos materiales suelen retener el agua con mayor intensidad que los inorgánicos.

Así, y en líneas generales, es posible distinguir, como esquematiza la Figura 12.17, tres tipos de agua:

- El agua intracelular, muy difícil de extraer.
- El agua capilar, que precisa temperatura para su extracción.
- El agua libre o ligada mecánicamente, la más fácil de extraer. Por lo general, ésta suele ser el 70% del agua total.

Figura 12.17. Estructura de un fango de EDAR en función del tipo de agua.

Por otro lado, la naturaleza y composición de la fracción inorgánica, sobre todo la presencia de metales pesados, puede condicionar el sistema de valorización.

4.1. LA CARACTERIZACIÓN DEL FANGO

El tratamiento biológico por fangos activos se basa en el desarrollo de determinados microorganismos aerobios sobre las partículas de materia orgánica, formando pequeños cuerpos esponjosos denominados flóculos biológicos, que se alimentan de los compuestos biodegradables disueltos en el agua residual. Se trata del mismo proceso que tiene lugar en el medio natural, sólo que con unas concentraciones de biomasa o sustrato mucho mayores, lo que hace imprescindible el aporte adicional de oxígeno.

4.1.1. Consecuencias de la actividad biológica

Para el correcto funcionamiento y desarrollo de la flora bacteriana de los fangos activos, la presencia de nutrientes como nitrógeno y fósforo es necesaria guardando cierta proporción con el carbono. Cuando la cantidad de N es muy elevada pueden existir problemas de inhibición por formación de amonio, sobre todo con elevados valores de pH.

El modelo básico, o convencional, de fangos activados, consiste en un tanque de aireación, un clarificador secundario y una línea de retorno de los fangos. El agua residual sedimentada, así como el fango recirculado, entran en el tanque por un extremo y son aireados por un periodo de unas 6 horas. Durante este periodo se produce la absorción, floculación y oxidación de la materia orgánica.

En la vida de los microorganismos se pueden diferenciar las siguientes etapas:

- *Latencia:* o etapa en la cual los microorganismos se adaptan al medio.
- *Crecimiento exponencial:* de los organismos que se han adaptado y crecen a velocidades cada vez mayores.
- *Estabilización:* o fase en la que la velocidad de crecimiento se estabiliza.
- *Respiración endógena:* cuando el sustrato se agota y hay muerte celular.

En la depuración se intenta trabajar en la etapa de crecimiento exponencial. Sin embargo, el proceso puede verse afectado por diversos parámetros externos:

- *Biodegradabilidad:* no todas las sustancias presentan el mismo ratio de biodegradabilidad, incluso una misma sustancia se torna menos degradable a medida que se va descomponiendo.
- *Temperatura:* este parámetro afecta a la velocidad de desarrollo de los microorganismos, en la síntesis protoplasmática. La temperatura elevada favorece la degradación y la baja puede llegar a inhibirla. 25 ℃ se considera una temperatura ideal y los límites se pueden establecer entre 4 ℃ y 40 ℃. También interviene en el rendimiento de la biofloculación y el transporte de oxígeno.
- *Tóxicos:* Son los elementos no degradables: fenoles, cianuros, aceites, Cr^{6+}, Cd, Pb, Zn, etc.
- *Oxígeno:* disuelto en el agua. El límite de operación es de 2 ppm. Trabajar con mayor cantidad de oxígeno no reporta ningún beneficio. Cantidades inferiores a 1 ppm suponen una alteración morfológica del fango que tiende a agruparse en grandes flóculos. Ello condicionara el posterior comportamiento del fango.
- *pH:* el óptimo consiste en trabajar en valores comprendidos entre 6,5 y 8,5. En medio ácido predominan los hongos sobre las bacterias y pueden presentar problemas a la hora de la floculación. Uno de las variables que más perjudica a la flora es el cambio brusco de pH.
- *Salinidad:* algo de sales es bueno ya que aumenta la acción iónica y la coagulación es más fácil. Pero hay un límite, alrededor de 3.000 ppm, por encima del cual los organismos no pueden vivir.

La Tabla 12.8 muestra los valores típicos de la composición de la célula de una bacteria de fango activo.

En las EDAR se debe llevar a cabo un control de la presencia de nutrientes para el correcto funcionamiento y desarrollo de los microorganismos. Es re-

Tabla 12.8. Composición de una bacteria de fango activo

Elemento	% en peso
Carbono	50
Oxígeno	20
Nitrógeno	13
Hidrógeno	8
Fósforo	3
Sulfuros	2
Hierro	0,4

comendable realizar el control cada 15 días y la relación aconsejable a mantener es DBO:N:P = 100:5:1. Con frecuencia muchos de los nutrientes pueden quedar inhibidos por descargas industriales.

4.1.2. Parámetros generales de contaminación

La naturaleza de los fangos será una lógica consecuencia de las aguas residuales de la que proceden y del sistema de producción (estación generadora de fangos). El agua residual influye básicamente por la interacción de tres parámetros fundamentales:

- *Materia oxidable:* Se trata de la materia que consume oxígeno y no permite la vida de los microorganismos. La demanda química de oxígeno (DQO) mide la cantidad de oxígeno equivalente al dicromato potásico usado para oxidar la materia orgánica de una muestra de agua residual. Es una reacción intensa que permite medir, por lo general, más del 95% de la materia orgánica. De todas maneras, no sirve si hay piridina, benceno o amonio. La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) mide la cantidad de oxígeno preciso para oxidar la materia biodegradable asimilable por los microorganismos. Es una reacción más suave que la DBO y la más habitual es la que mide el oxígeno consumido a los 5 días: DBO_5. Otro indicador es el COT (carbono orgánico total), en el que se mide el total de carbono no inorgánico presente en la muestra.
- *Sólidos en suspensión:* El término SST (sólidos en suspensión totales) corresponde a la cantidad de sólidos de tamaño superior a 0,45 micras. Dentro de ellos hay que distinguir los sedimentables y los no sedimentables. Los sólidos disueltos también se pueden denominar sólidos filtrables; entre ellos se pueden distinguir los coloidales, fracción comprendida entre 0,001 y 1 micra, y los sólidos disueltos, es decir la fracción de tamaño inferior a 0,001 micras.
- *Materias tóxicas:* Se trata de compuestos que disminuyen o inhiben la actividad biológica y que pueden acumularse en la cadena trófica, es decir, son bioacumulables. Se trata, por tanto, de sustancias de naturaleza orgánica (fenoles, aldehídos, organohalogenados, fitosanitarios, etc.) o inorgánica: metales pesados.

La Figura 12.18 pretende clarificar la caracterización de los materiales en suspensión haciendo referencia, únicamente, a sus propiedades físicas.

En la parte inferior de la figura se insertan unos ejemplos. La cifra que aparece al lado de diversos materiales corresponde a la superficie específica típica, en m^2/cm^3. Ello da una idea del tiempo de sedimentación. Así, la grava, con una superficie específica de $6 \cdot 10^{-4}$ m^2/cm^3, puede tardar 0,1 segundos en precipitar, mientras que las sustancias minerales precipitadas lo harán en 11 minutos y las bacterias en 20 horas. En el otro extremo, los productos hidrosolubles pueden necesitar 2 años y algunas macromoléculas más de 20 años. De esta manera se entiende que, de una forma u otra, todos los contaminantes van a pasar a formar parte de los fangos. Los disueltos, verdaderas disoluciones, forman parte integrante del agua y en el fango también hay agua.

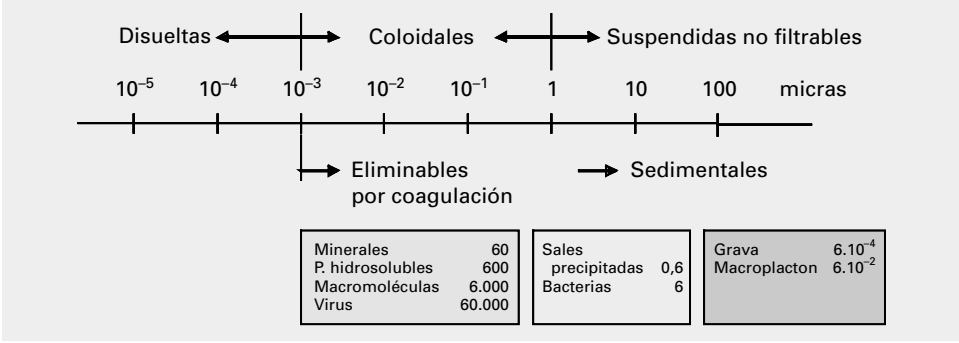


Figura 12.18. Clasificación de las partículas presentes en los fangos de EDAR.

4.1.3. La presencia de metales pesados

Los metales están casi omnipresentes en los fangos de EDAR, en particular en las depuradoras en las que vierten aguas industriales. Por lo general, los metales se hallan en tres formas:

- Fracción precipitada, formando sales; por orden de importancia: cloruros, sulfatos, hidróxidos, fosfatos, carbonatos, etc.
- Fracción disuelta. Cuando el agua se evapora las sales quedan en la parte seca del fango.
- Fracción asociada al complejo orgánico.

Los metales analizados son aquéllos que de alguna manera interfieren en la etapa de depuración y en consecuencia en los fangos. Se pueden clasificar en:

- Metales considerados como indeseables: Al, Fe, Mn, Sn, Ba y Cr^{+3}.
- Metales considerados como tóxicos: As, Cd, Cu, Cr^{+6}, Ni, Hg, Pb, Se, Co y Zn.

Por orden de importancia, los metales más frecuentes son: Fe, Ca y Mn. En la Tabla 12.9 puede observarse la cantidad de metales presentes en las principales EDAR de Cataluña, haciendo mención de que se trata de un área muy industrial.

Tabla 12.9. Presencia de metales pesados en los fangos

Metal	Concentración en el líquido (mg/l)		% de separación después de los fangos	Concentración en los fangos (mg/kg materia seca)
	Rango	Valor medio		
Cd	0,008-0,142	0,02	20-45	31
Cr	0,02-0,700	0,05	40-80	1.100
Cu	0,20-3,36	0,10	0-70	1.250
Hg	0,0002-0,044	0,001	20-75	6,6
Ni	0,002-8,80	0,10	15-40	400
Pb	0,050-1,25	0,20	50-90	830
Zn	0,030-8,31	0,18	35-80	2.780

Los metales pesados indicados en la tabla precedente pueden incidir en el proceso cuando su cantidad, por término medio, supera la concentración de 0,3 mg/l en el agua residual a tratar. Otro parámetro a tener en cuenta es la baja e irregular capacidad de separación de los metales. En otras palabras, la cantidad de metales presentes en las aguas abajo de la EDAR son importantes.

Respecto a los metales presentes en el agua residual urbana con respecto al agua tratada (la que sale de la depuradora), un dato significativo es que el metal que presenta mejor retención es el Fe (cerca de un 75%), lo que indica que ésta es la cantidad que queda en los fangos, manteniendo el agua depurada el 25% del valor original. En cambio, para el resto de los metales pesados, tan sólo el Zn y el Cu ostentan valores significativos: 50% y 25%, respectivamente, lo que significa que en los fangos quedarán retenidos el 50% y el 75% de estos metales. Para el resto: Mn, Pb, Cd, Ni, Cr y Hg, los valores de retención son muy bajos, lo que de cara al fango significa que existirán pocos metales, ya que éstos seguirán con las aguas depuradas. De todo lo cual se deduce que debe tenerse un cuidado especial sobre las fuentes que vierten, habitualmente industrias, aguas con contenidos elevados de estos metales al no quedar retenidos en los fangos y seguir en las aguas depuradas.

Una de las últimas aplicaciones de un residuo tan abundante, al menos en el arco mediterráneo, como es el hueso de aceituna se está usando con éxito para la absorción de metales pesados contenidos en las aguas residuales. El proceso se realiza gracias a las diferentes cargas eléctricas entre la superficie del hueso y los iones metálicos. Más tarde, la biomasa podrá usarse como materia prima para generar energía donde, obviamente, los metales serán adsorbidos por el carbón activo en la fase de limpieza de gases.

4.1.4. Otros elementos inorgánicos

Bajo este título y tratándose de fangos procedentes de la depuración de aguas residuales se entiende que se habla de N, P y K, elementos que, por otra parte, coinciden con los principales nutrientes de los vegetales de donde se desprende que existe una clara correlación entre la presencia de estos elementos y ciertas disfunciones en los vegetales.

El nitrógeno y el fósforo se consumen y luego se vierten de manera irreversible en el medio ambiente donde se acumulan bajo diversas formas químicas que dan lugar a diferentes problemas ambientales. Uno de los principales problemas de las aguas naturales es la eutrofización, proceso que se desarrollará más adelante.

4.1.4.1. Tecnologías avanzadas de nitrificación/desnitrificación

En las aguas residuales la presencia de nitrógeno consiste en nitritos, nitratos, amonio y nitrógeno orgánico. Todas estas formas de nitrógeno, incluyendo el N_2, son bioquímicamente interconvertibles entre sí, constituyendo el proceso de nitrificación y desnitrificación que conforman la base del ciclo del nitrógeno. Se entiende por nitrógeno orgánico el nitrógeno que está enlazado a moléculas orgánicas con un estado de oxidación 3, no se incluyen las formas de aminas, proteínas, péptidos o urea. La suma del nitrógeno orgánico y el amonio constituyen el denominado nitrógeno reducido. La suma de los nitritos y nitratos conforma el llamado nitrógeno oxidado.

El nitrógeno orgánico puede ser biológicamente convertido en amoníaco (NH_3) o en ión amonio (NH_4^+). Entre ellos existe un equilibrio de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$NH_4^+ \leftrightarrow NH_3 + H^+$$

La eliminación biológica del nitrógeno vía nitrificación/desnitrificación constituye una opción ampliamente utilizada para la eliminación del amonio de las aguas residuales. El proceso es aerobio y responde a:

$$NH_4^+ + 3/2\ O_2 \rightarrow NO_2^- + H_2O + 2H^+$$
$$NO_2^- + 1/2\ O_2 \rightarrow NO_3^-$$
$$5CH_3COOH + 8NO_3^- \rightarrow 8HCO_3^- + 2CO_2 + 6H_2O + 4N_2$$

Como indican las reacciones anteriores, el proceso precisa gran cantidad de aire en el interior del líquido y, en las aguas con poca materia orgánica, la aportación de la misma en forma de metanol.

El proceso ANAMMOX (*ANaerobic AMMonium OXidation*) ha surgido recientemente para el tratamiento de aguas con abundante nitrógeno y bajas concentraciones de materia orgánica, debido a que es un proceso autotrófico y anóxico, es decir, no necesita materia orgánica ni oxígeno. El proceso responde a la siguiente estequiometría:

$$NH_4^+ + 1{,}32\ NO^- + 0{,}07HCO_3 + 0{,}13H^+ \rightarrow$$
$$1{,}02N_2 + 0{,}26NO_3^- + 0{,}07CH_2O_{0,5}N_{0,15} + 2{,}03H_2O$$

El resultado es un proceso más económico y efectivo para eliminar el nitrógeno que el sistema convencional. De momento existen diversas plantas de demostración cuyo principal problema es el lento crecimiento de las bacterias (en la actualidad del orden de tres meses).

En el caso del fósforo, el elemento se encuentra en forma de ortofosfatos (PO_4^{3-}), fosfatos condensados (pirofosfatos, polifosfatos, hexametafosfatos, etc.) y fosfatos combinados con materia orgánica, denominado fósforo orgánico: R-PO_4^{2-} (como los fosfolípidos). Cada una de estas fracciones tiene una parte hidrófila y otra hidrófoba, en suspensión.

La recuperación y reciclado del fósforo y nitrógeno de las aguas residuales es uno de los objetivos de la química ambiental moderna. Así, se ha desarrollado un fertilizante comercial de alta calidad, denominado estruvita, de fórmula $MgNH_4PO_4 \cdot 6\ H_2O$. Este proceso permite la gestión sostenible del recurso natural no renovable (fosfato) y, por otra parte, evita los problemas de contaminación de las aguas mejorando la calidad de los ecosistemas acuáticos.

La síntesis de la estruvita consiste en la recuperación de fósforo y amonio. A escala experimental, y de planta piloto, la mayoría de estos procesos se han realizado mediante la utilización de un intercambiador iónico.

Estudios bien documentados afirman que si se tuviesen que fabricar o sintetizar las sales que aportan el nitrógeno y el fósforo que contiene una tonelada de fango de EDAR seco, costaría 50 €, es decir, aproximadamente lo mismo que hay que pagar para verter esta tonelada al vertedero.

4.1.4.2. Concepto de eutrofización

La eutrofización es un proceso natural en ecosistemas acuáticos, especialmente en lagos, caracterizado por un aumento en la concentración de nitratos y fosfatos, con los consiguientes cambios en la biodiversidad. Las aguas eutróficas, en contraste con las oligotróficas, son más productivas. Sin embargo, más allá de ciertos límites, el proceso reviste características negativas al aparecer grandes cantidades de materia orgánica cuya descomposición microbiana ocasiona un descenso en los niveles de oxígeno.

Cuando un lago o embalse es pobre en nutrientes (oligotrófico) tiene las aguas claras, la luz penetra bien, el crecimiento de las algas es pequeño y mantiene una reducida fauna. Las plantas y animales que se encuentran son los característicos de aguas bien oxigenadas, como las truchas.

Al ir cargándose de nutrientes el lago se convierte en eutrófico. Crecen las algas en gran cantidad,

con lo que el agua se enturbia. Las algas y otros organismos, cuando mueren, son descompuestos por la actividad de las bacterias con lo que se consume oxígeno. No pueden vivir peces que necesitan aguas ricas en oxígeno, por eso en un lago de estas características se encuentran barbos, percas y otros organismos de aguas poco ventiladas. En algunos casos se producirán putrefacciones anaeróbicas acompañadas de malos olores Las aguas son turbias y de poca calidad desde el punto de vista del consumo humano o de su uso para actividades deportivas. El fondo del lago se va rellenando de sedimentos y su profundidad va disminuyendo.

La explosión de algas que acompaña a la primera fase de la eutrofización provoca un enturbiamiento que impide que la luz penetre hasta el fondo del ecosistema. Como consecuencia en el fondo se hace imposible la fotosíntesis, productora de oxígeno libre, a la vez que aumenta la actividad metabólica consumidora de oxígeno de los descomponedores, que empiezan a recibir los excedentes de materia orgánica producidos cerca de la superficie. De esta manera en el fondo se agota pronto el oxígeno por la actividad aerobia y el ambiente se vuelve pronto anóxico (anaerobio). La radical alteración del ambiente que suponen estos cambios, hace inviable la existencia de la mayoría de las especies que previamente formaban el ecosistema.

El proceso de putrefacción consume una gran cantidad del oxígeno disuelto y las aguas dejan de ser aptas para la mayor parte de los seres vivos. El resultado final es un ecosistema casi destruido.

Una concentración alta de nitrato en el agua potable constituye un problema sanitario, en particular para los niños, porque en el estómago se convierte rápidamente en nitrito, el cual puede reducir la capacidad de transporte de oxígeno en la sangre. La *Directiva de calidad del agua* establece un valor máximo aconsejable de 25 mg nitrato/l de agua potable.

En resumen, la eutrofización se refiere a toda esta serie de sucesos que comienzan con el enriquecimiento de nutrientes, el crecimiento y la muerte del fitoplancton, la acumulación de detritos, el aumento de las bacterias y, por último, el agotamiento del oxígeno y la sofocación de los organismos superiores. El metabolismo anaerobio produce, además, emisiones malolientes, principalmente óxidos de azufre, sulfuro de hidrógeno e hidrocarburos.

En algunos ecosistemas el factor limitante es el fosfato, como sucede en la mayoría de los lagos de agua dulce, pero en muchos mares el factor limitante es el nitrógeno para la mayoría de las especies de plantas.

En los últimos 20 o 30 años las concentraciones de nitrógeno y fósforo en muchos mares y lagos casi se han duplicado. La mayor parte les llega por los ríos. En el caso del nitrógeno, una elevada proporción (alrededor del 30%) llega a través de la contaminación atmosférica. El nitrógeno es más móvil que el fósforo y puede ser lavado a través del suelo o incorporar al aire por evaporación del amoníaco o por desnitrificación. El fósforo es absorbido con más facilidad por las partículas del suelo y es arrastrado por la erosión o disuelto por las aguas de escorrentía superficiales.

En condiciones naturales en un sistema acuático entra menos de 1 kg de fosfato por hectárea y año. Con los vertidos humanos esta cantidad aumenta mucho; durante muchos años los jabones y detergentes fueron los principales causantes de este problema. En las décadas de 1960 y 1970, el 65% en peso de los detergentes era un compuesto de fósforo, el tripolifosfato sódico, que se usaba para «secuestrar» (quelar) los iones Ca, Mg, Fe y Mn. De esta forma se conseguía que estos iones no impidieran el trabajo de las moléculas surfactantes que son las que hacen el lavado. Estos detergentes tenían alrededor de un 16% en peso de fósforo. El resultado era que los vertidos domésticos y de lavanderías contenían una gran proporción de ión fosfato. A partir de 1973, Canadá y luego otros países, prohibieron el uso de detergentes que tuvieran más de un 2,2% de fósforo, obligando así a usar otros quelantes con menor contenido de este elemento. Algunas legislaciones han llegado a prohibir los detergentes con más de 0,5% de fósforo.

Fuentes de eutrofización

La eutrofización es un proceso que se va produciendo lentamente de forma natural en todos los lagos del mundo, porque todos van recibiendo nutrientes, que debe distinguirse de la eutrofización de origen humano. Los vertidos humanos aceleran el proceso hasta convertirlo, muchas veces, en un grave problema de contaminación. Las principales fuentes de eutrofización son:

- Los vertidos urbanos, que llevan detergentes y residuos orgánicos.
- Los vertidos ganaderos y agrícolas, que aportan fertilizantes, desechos orgánicos y otros residuos ricos en fosfatos y nitratos.

En los últimos años, las EDAR, en particular del noroeste de la UE, han reducido el vertido de fósforo entre un 50% y un 80%, gracias a la incorporación de nuevas tecnologías y a la paulatina reducción de los fosfatos en los detergentes. El tratamiento terciario (eliminación de nutrientes) también es determinante en este aspecto.

Al margen de los problemas de los fosfatos, los detergentes convencionales son agresivos y atacan a las superficies donde se halla depositada la suciedad. Los expertos están diseñando detergentes a la carta, es decir, tensoactivos, derivados de azúcares y grasas, de muy baja toxicidad y elevada degradabilidad.

Medidas para evitar la eutrofización

Lo más eficaz para luchar contra este tipo de contaminación es disminuir la cantidad de fosfatos y nitratos en los vertidos, usando detergentes con baja proporción de fosfatos, empleando menor cantidad de detergentes y aplicando las siguientes medidas:

- No abonando en exceso los campos y usando los desechos agrícolas y ganaderos como fertilizantes, en vez de verterlos, etc.
- Tratar las aguas residuales en EDAR que incluyan tratamientos biológicos y químicos que eliminen el fósforo y el nitrógeno.
- Almacenar adecuadamente el estiércol que se usa en agricultura.
- Usar los fertilizantes más eficientemente.
- Cambiar ciertas prácticas de cultivo por otras menos contaminantes. Así, por ejemplo, retrasar el arado y la preparación de los campos para el cultivo hasta la primavera, y plantar los cultivos de cereal en otoño asegura tener cubiertas las tierras con vegetación durante el invierno con lo que se reduce la erosión.
- Reducir las emisiones de NO_x y amoníaco.

La principal vía de entrada de los abonos en las aguas superficiales es a través de la escorrentía, que los arrastra junto a las partículas del suelo, y también a través de aguas subterráneas que después vierten en ríos y lagos. El contenido de fósforo y nitrógeno en el suelo es más alto en las capas más superficiales, es decir, las más erosionadas. Además, el proceso erosivo tiende a afectar más a las partículas finas que son las que contienen la mayor parte del nitrógeno y fósforo. Debido a esto, el sedimento erosionado tiene una mayor concentración de nutrientes que el suelo del que proviene; para el fósforo es frecuente entre 2 y 6 veces más y para el nitrógeno entre 2 y 8 veces más.

La vegetación, especialmente la herbácea, no sólo reduce la erosión sino que también toma los nutrientes del suelo evitando que éste se enriquezca en exceso. Cuando esta vegetación muere devuelve el nitrógeno y el fósforo al suelo en formas orgánicas que son menos arrastradas que las formas minerales originales.

Eutrofización de origen atmosférico

Entre los contaminantes atmosféricos están presentes los óxidos de nitrógeno (NO_x) y los óxidos de azufre (SO_x). Éstos reaccionan con el agua atmosférica para formar ión nitrato (NO_3^-) e ión sulfato (SO_4^{2-}) que una vez que alcanzan el suelo forman sales solubles. De esta manera se solubilizan los cationes del suelo, provocando su empobrecimiento en nutrientes. Estas sales son arrastradas fácilmente a los acuíferos y a los ríos, contaminándolos. En estos últimos la importante incorporación de nutrientes así producida, puede dar lugar a un proceso de eutrofización. Ésta afectará finalmente también a los embalses, así como a los lagos o mares donde los ríos desemboquen.

El transporte por carretera es responsable del 23% de las emisiones eutrofizantes y los procesos de generación eléctrica del 12%, en ambos casos a través de las emisiones de óxidos de nitrógeno; por su parte, el sector agrícola-ganadero emite el 44% de los precursores eutrofizantes mediante las emisiones de amoníaco; otros procesos industriales originan también emisiones de óxidos de nitrógeno.

Para evitar la eutrofización por vía atmosférica es imprescindible reducir las emisiones de óxidos de nitrógeno y de amoníaco. Como resulta obvio, una reducción en las emisiones de nitrógeno tendría efectos positivos tanto en la reducción de los aportes eutróficos como también sobre otros problemas como la lluvia ácida, el ozono troposférico y la destrucción de la capa de ozono.

4.2. LÍNEA DE GENERACIÓN DE FANGOS

Una EDAR es una instalación donde mediante procesos físicos, químicos y/o biológicos se consigue eliminar la materia orgánica presente en el agua por este orden: en suspensión, coloidal y disuelta.

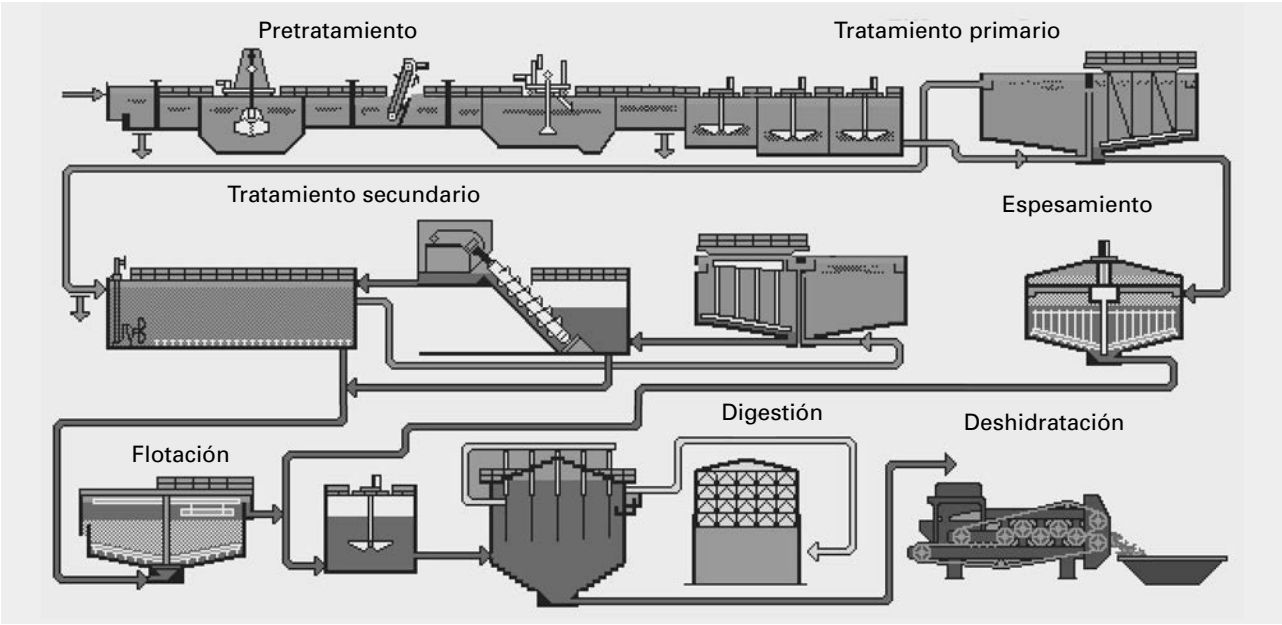


Figura 12.19. Esquema tipo de una EDAR. (Fuente: www.geocities.com).

Según la ley española, las aguas residuales se deben depurar mediante:

- *Tratamiento primario:* Tratamiento de aguas residuales urbanas mediante un proceso físico y/o químico que incluya la sedimentación de sólidos en suspensión u otros procesos en los que la DBO_5 de las aguas residuales que entren se reduzca, por lo menos, en un 20% antes del vertido, y el total de sólidos en suspensión en las aguas residuales de entrada se reduzca por lo menos en un 50%.
- *Tratamiento secundario:* Tratamiento mediante un proceso que incluya, por lo general, un tratamiento biológico con sedimentación secundaria u otro proceso en el que se respeten los requisitos del cuadro 1 del Anexo I de la Directiva 91/271/CEE.
- *Tratamiento más riguroso:* Tratamiento mediante un proceso más completo que el secundario que incluya, por lo general, un tratamiento biológico con sedimentación secundaria y otro proceso que consiga que los efluentes respeten los requisitos establecidos para «zonas sensibles» en la Directiva 9 1/271 /CEE.

La Figura 12.20 muestra un esquema sinóptico de una EDAR convencional.

Los tratamientos que se pueden dar en una EDAR, en función de las necesidades de depuración debido al agua de entrada y la calidad pretendida del vertido, son los siguientes:

Pretratamiento: principalmente acción mecánica. Consta de una primera fase integrada por rejas de gruesos y de finos que retienen piedras, plásticos, papeles, etc., presentes en las aguas residuales, hasta los límites marcados por la luz de reja (normalmente de 3 a 5 cm para los gruesos, y menos de 3 mm para la reja de finos).

A continuación la instalación tiene canales de desarenado y desengrasado. Las arenas sedimentan en la parte inferior y las grasas se pueden eliminar por flotación.

En casos donde hay riesgo de variaciones bruscas y significativas de la carga contaminante debido, por ejemplo, a que la EDAR recibe aguas industriales, es conveniente la incorporación de tanques de mezcla y homogeneización en los que mezclar agua de diferentes orígenes para amortiguar la diferencia de carga.

Tratamiento primario: decantación de sólidos orgánicos e inorgánicos en suspensión. En un tanque de decantación por gravedad y mediante microburbujas se flota un sobrenadante de partículas menos densas que el agua. Pueden o no añadirse coagulantes para favorecer la decantación en caso de carga orgánica elevada. Genera un fango primario de aproximadamente 4% de materia seca.

Tratamiento secundario: tratamiento biológico aerobio, generalmente mediante sistemas de biodis-

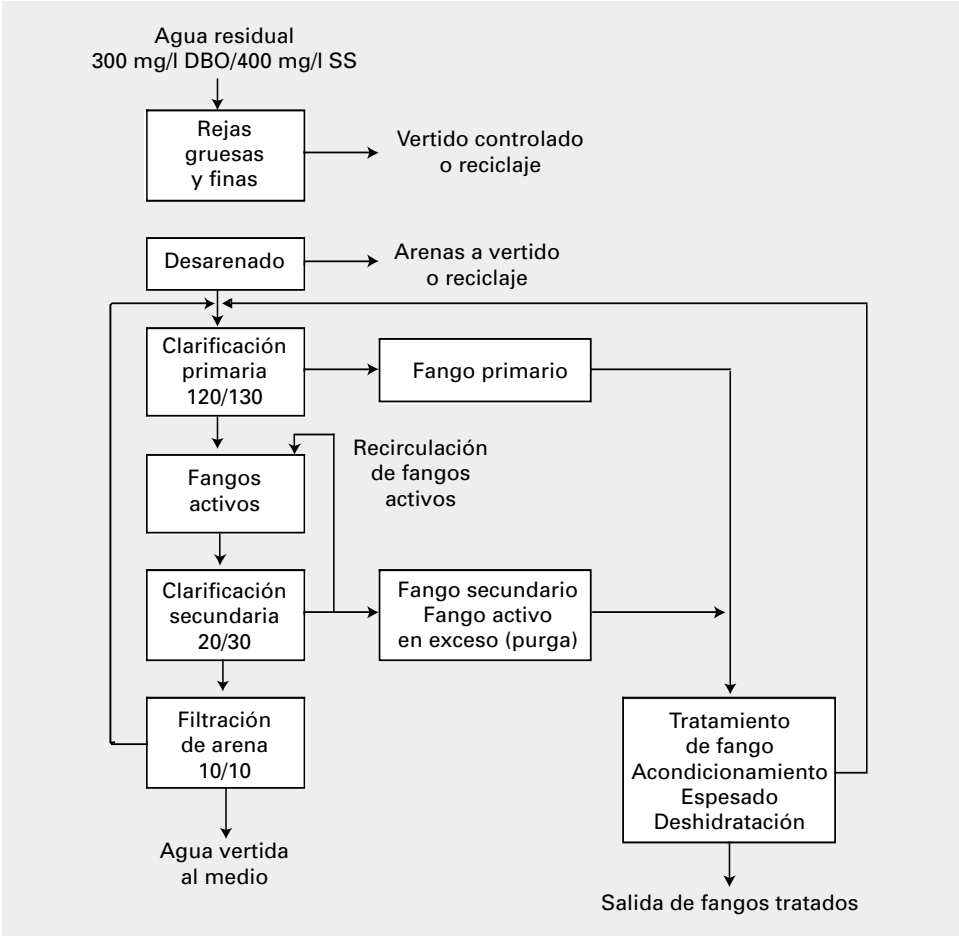


Figura 12.20. Diversos tratamientos en la depuración de agua urbana (las cifras hacen referencia al contenido en DBO y ss).

cos, biofiltros, lechos filtrantes o más habitualmente fangos activados, donde en un tanque aireado se produce la degradación aerobia de la materia orgánica coloidal y disuelta arrastrada por las aguas. Se recircula una parte de las aguas tratadas con su correspondiente contenido de fango activo para mantener la población microbiana. Al estar ésta en constante crecimiento el sistema se purga. Para eliminar el P y el N se alternan fases anóxicas y aerobias. El fango resultante es el fango secundario, con aproximadamente un 1% de materia seca.

Tratamiento terciario: procesos adicionales de afino de la calidad del agua para poder reutilizarla o verterla en cauces sensibles. Puede ser mediante filtros, adsorción en carbón activo (para metales o COPs), tratamientos químicos (precipitación de P o metales, corrección de pH, cloración, eliminación de amoníaco), radiación ultravioleta y membranas. La calidad del fango terciario procedente de estos tratamientos adicionales opcionales es totalmente variable en función de los tratamientos en cuestión.

Los fangos primarios y secundarios suelen mezclarse para su posterior tratamiento, tanto si es anaerobio, ya que ambos contienen materia orgánica, como si es mecánico. De hecho, los fangos primarios ayudan a la deshidratación debido a su mayor capacidad de perder agua que los fangos secundarios, ya que al ser la materia orgánica en forma de microorganismos retienen más el agua. Los fangos terciarios, en cambio, son de naturaleza fisicoquímica y pueden resultar un inconveniente si se mezclan con los orgánicos a efectos de la deshidratación, y en ningún caso se mezclarán para someterlos a digestión anaerobia puesto que sus compuestos pueden ser inhibidores.

La Figura 12.21 muestra la distribución de partículas y materia disuelta presente habitualmente en aguas residuales municipales. Los sólidos en suspensión sedimentables serían los presentes en el fango primario, junto a parte de los no sedimentables en caso de añadir coagulantes/floculantes. El resto de partículas orgánicas son degradadas en el proceso biológico hasta los niveles permitidos.

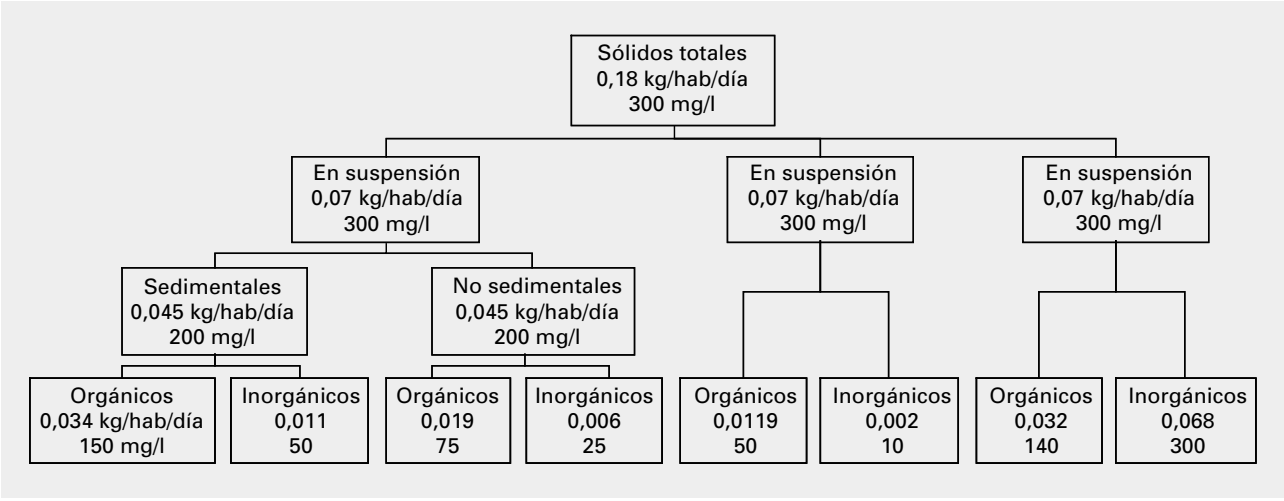


Figura 12.21. Diversos tipos de materiales que integran los fangos.

La Tabla 12.10 muestra algunos parámetros de unos fangos tipo, procedentes de una EDAR que sirve a una población de 20.000 habitantes con aportación de aguas industriales asimilables.

Tabla 12.10. Caracterización de los diversos fangos

Parámetro	Fangos primarios	Fangos secundarios	Fangos deshidratados
Sólidos secos	2-6%	0,5-2%	15-35%
Sólidos volátiles	60-80%	50-70%	30-60%
Gravedad específica del fango	~1,02	~1,05	~1,1
Gravedad específica de los sólidos del fango	~1,4	~1,25	~1,2-1,4
Esfuerzo cortante (kN/m^2)	<5	<2	<20
Contenido energético (MJ/kg SV)	10-22	12-20	25-30
Tamaño de partícula (90 por 100)	<200 μm	<100 μm	<100 μm

4.3. TIPOS DE FANGOS

En una EDAR se pueden tener diversos tipos de fangos según el tratamiento o diseño de la depuradora:

- Fangos primarios frescos, los procedentes de la depuración primaria.
- Fangos primarios digeridos. A la salida de un reactor anaerobio.
- Fangos activados, los resultantes de la depuración biológica.
- Fangos mixtos frescos. Una mezcla de los fangos primarios y fangos activados en exceso.
- Fangos mixtos digeridos anaerobiamente.
- Fangos estabilizados anaerobiamente.
- Fangos procedentes de tratamiento fisicoquímico.

Una vez generado el fango, los técnicos de proceso suelen diferenciar dos tipos, que tiene que ver directamente con la deshidratación y el secado.

- *Fangos de naturaleza hidrófoba:* generalmente de composición mineral (inorgánica) de procedencia industrial, como puede ser una planta de tratamiento de áridos o resultantes de la potabilización de aguas.
- *Fangos de naturaleza hidrófila:* procedentes, por excelencia, de las EDAR. En ellos, junto al agua ligada mecánicamente (que suele representar el 70% del total) hay una gran cantidad de agua de hidratación coloidal, agua capilar y agua celular. Esta agua está fuertemente retenida y los sistemas de deshidratación mecánica no pueden liberarla, por ello se debe recurrir al secado. En la práctica, para lograr una rápida pérdida del agua libre es preciso romper la estabilidad coloidal y aumentar significativamente, de manera artificial, el tamaño de las partículas.

La Tabla 12.11 resume las principales características de los tipos de fangos según el sistema de tratamiento de agua y el tipo de generación de fango. Así mismo se hace una breve síntesis del aspecto físico.

Tabla 12.11. Aspecto de los fangos según tratamiento de agua y del fango

	Tratamiento de agua	Tratamiento de fango	Aspecto físico
F1	Fisicoquímico + sedimentación primaria	Deshidratación mecánica	Rojizo. Fibroso
F2	Fangos activados	Digestión anaerobia + deshidratación mecánica	Gris. Partículas finas
F3	Fisicoquímico + Fangos activados	Digestión anaerobia + deshidratación mecánica	Gris. Partículas finas
F4	Fisicoquímico	Digestión anaerobia + deshidratación mecánica	Gris oscuro. Partículas finas
F5	Fisicoquímico + Fangos activados	Digestión anaerobia + deshidratación mecánica	Marrón. Partículas finas
F6	Fangos activados	Digestión anaerobia + deshidratación mecánica	Gris. Partículas finas
F7	Fisicoquímico	Deshidratación química + deshidratación mecánica	Marrón. Fibroso

4.4. ANÁLISIS DE UN FANGO TÍPICO DE EDAR

Para exponer un análisis de un fango de EDAR típico, se elige el procedente de una ciudad industrial de las cercanías de Barcelona. La Tabla 12.12 muestra las condiciones en que se genera (razonablemente secos).

Tabla 12.12. Análisis de un fango típico de EDAR mixta

Fracción	% en peso
Humedad	26,0
Fracción orgánica	51,9
Fracción inorgánica	22,1

Las siguientes tablas muestran los análisis químicos, en forma de óxidos, de las fracciones orgánica e inorgánica.

El análisis facilitado hace especial referencia a los metales, sin embargo se ha creído necesario expresar los metales en forma de óxidos ya que en la etapa de conversión energética y, sobre todo en la cámara de oxidación y postcombustión, los metales pasarán a la forma más oxidada.

Por otra parte, la caracterización pone de relieve una presencia no despreciable de álcalis, lo que constituye una advertencia de cara a la máxima temperatura en que debe trabajar el lecho fluidizado, para evitar la fusión y colapso del árido que compone el lecho. La Tabla 12.14 hace referencia a la distribución de los compuestos orgánicos.

Tabla 12.13. Caracterización de la fracción inorgánica de un fango de EDAR

CARACTERIZACIÓN DE LA FRACCIÓN INORGÁNICA	
	% base húmeda
Na_2O	0,51
K_2O	0,13
CaO	5,90
MgO	0,60
Al_2O_3	0,94
Cr_2O_3	0,58
Fe_2O_3	5,70
SiO_2	4,00
P_2O_5	2,40
Óxidos diversos	1,40
Parcial	**22,16**

Tabla 12.14. Caracterización de la fracción orgánica de un fango de EDAR

CARACTERIZACIÓN DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA	
	% base húmeda
C	27,20
H	5,60
S	2,30
Cl	0,30
N	4,50
O	12,00
Parcial	**51,90**

La caracterización de la fracción orgánica que aparece en la tabla precedente muestra una importante cantidad de azufre, por otra parte normal en los fangos de EDAR, que obligará a una importante labor en la etapa de neutralización de gases procedentes de la conversión energética.

El azufre y el cloro generan gases ácidos que son arrastrados por la corriente de gases dando lugar a corrosiones más o menos importantes a lo largo de la instalación. Una de las ventajas del lecho fluidizado es que permite, junto a las materias primas, añadir neutralizantes, con lo que se forma una sal neutra, e inerte, en el reactor. Obviamente la cantidad de reactivos deberá descontarse de la empleada en la depuración de los gases.

Tabla 12.15. Caracterización de fangos de EDAR

Parámetro	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
PCI (kJ/kg)	15.240	11.470	9.920	12.600	14.900	13.690	15.530
% en peso							
H	4,7	4,7	4,9	5,1	5,5	5,2	5,3
C	29,6	29,2	30,6	33,6	35,3	33,6	32,2
N	1,4	2,9	3,0	5,4	6,2	4,2	0,85
Na	0,07	0,62	0,26	1,0	0,13	0,4	nd
Mg	0,34	0,51	0,49	0,7	0,12	0,13	0,20
Al	1,2	2,7	0,07	0,9	0,74	0,66	0,70
Si	0,78	1,6	6,2	6,0	2,2	4,9	4,9
P	2,2	2,4	3,7	5,4	2,9	5,8	4,8
S	1	<1	1	<1	3	<1	<1
Cl	0,1	0,14	0,27	0,3	1,1	0,26	0,18
K	0,07	0,22	0,26	0,5	0,15	0,2	0,1
Ca	14	9,9	7,2	6,1	2,9	4,5	7,1
Ti	0,16	0,58	0,80	0,6	7,3	0,92	0,22
V	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01
Cr	0,05	0,01	0,01	0,04	2,6	0,03	0,30
Mn	0,05	0,01	0,01	0,01	0,04	0,01	0,03
Fe	2,7	0,73	0,72	1,3	4,5	2,3	4,7
Co	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Ni	nd	0,15	0,02	nd	0,01	nd	0,44
Cu	nd	0,24	0,24	nd	nd	0,15	1,3
Zn	0,22	0,59	0,22	1,0	0,03	0,38	0,8
Se	nd	nd	nd	nd	nd	0,01	0,02
Br	nd	0,01	0,01	0,04	0,01	0,01	nd
Rb	nd	nd	0,01	0,01	nd	nd	nd
Sr	0,43	0,57	0,43	0,33	0,19	0,38	0,28
Zr	nd	0,03	1,2	nd	0,19	nd	nd
Ag	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Sn	0,01	0,016	0,19	0,02	0,01	0,01	0,05
Sb	nd	nd	nd	nd	0,05	nd	nd
Ba	0,01	0,06	0,04	0,03	0,01	0,02	0,04
Pb	0,01	0,01	1,2	0,05	0,82	0,03	0,11

No obstante, si bien el sistema de neutralización expuesto es claramente favorable de cara al mantenimiento, la consulta debe canalizarse al fabricante del lecho fluidizado y conocer si el ahorro de neutralizantes es significativo. En el caso del cloro el sistema presenta la ventaja adicional de impedir, o minimizar, la generación de organoclorados.

La Tabla 12.15 muestra una caracterización completa de los fangos señalados en la Tabla 12.11.

Los fangos que muestra la Tabla 12.15 son de EDAR, no obstante vale la pena resaltar algunas particularidades:

- Todos ellos contienen S y Cl, lo que en el caso de someterlos a procesos de conversión energética van a dar lugar a gases ácidos.
- La cantidad de metales pesados es importante en todos ellos.
- El fango 5 (F5) es de naturaleza eminentemente industrial por el elevado contenido de ciertos metales (Ti, Cr, Pb, etc.).
- En la mayoría de los fangos la cantidad de álcalis es importante, lo que puede condicionar la estabilidad del lecho fluidizado en el caso de someterlo a una incineración o gasificación.
- Excepto en el caso del fango 3 (F3), el PCI de todos ellos es notable.

5. El fango de EDAR como combustible

Una vez analizada la estructura típica de un fango de EDAR, y si el destino va a ser la valorización energética, es necesario definir el PCS y el PCI de un combustible:

- El PCS (poder calorífico superior) es la energía total contenida en el combustible que se liberará en la combustión. A causa del hidrógeno presente se forma agua en la combustión, aunque se vaporiza instantáneamente a la temperatura de trabajo.
- El PCI (poder calorífico inferior) equivale al anterior habiéndole deducido el calor de vaporización del agua formada. El PCI es un término técnico, ya que en la inmensa mayoría de las aplicaciones industriales los gases de combustión son emitidos a temperatura superior a 100 ºC y, por tanto se pierde el calor latente del agua formada.

En el caso del gas natural, el PCS es el valor que sirve de base para la facturación. No obstante, el valor de la energía a efectos prácticos se debe calcular sobre el PCI.

Muchos autores no reconocen el fango de EDAR como un combustible propiamente dicho por el hecho de que, después de la deshidratación, posee una cantidad de agua del 75%. A pesar de ello contiene cantidades notables de carbono, hidrógeno, y la mayoría de los fangos también azufre. Al margen del contenido en humedad, la cantidad de inertes pueden entorpecer el correcto desarrollo de la valorización energética.

En el caso de los fangos de EDAR, combustible sólido, el PCI se puede evaluar con una gran aproximación usando la fórmula de Doulong si se conoce la composición elemental. Existe un sinfín de expresiones experimentales que determinan el PCI a partir del análisis elemental y se basan en que el calor desprendido por un combustible es igual a la suma de los calores generados por los elementos elementales que lo componen, restando el posible hidrógeno consumido por el oxígeno. Una fórmula que proporciona un PCI con notable aproximación es:

$$PCI = 7.831C_{org} + 35.932\left(H\frac{O}{8}\right) + \\ + 2.212S - 3.545C_{inorg} + 1.187O + 578N$$

Para los cálculos habituales que realizan los técnicos la aplicación de esta fórmula proporciona un valor suficientemente aproximado del PCI del combustible. Los fangos, como cualquier otro combustible, no pueden valorizarse energéticamente cuando no están suficientemente deshidratados, es decir, es preciso llevar a cabo un secado cuya intensidad dependerá del sistema de conversión energético elegido. Así, si se trata de una incineración en horno rotatorio, la sequedad del fango puede alcanzar el 90%, mientras que si el fango se valoriza en un reactor de lecho fluidizado, la sequedad no debería sobrepasar el 50%.

En este punto es donde se revela fundamental el concepto de PCI útil. Éste se define como el PCI una vez deducido el calor latente de vaporización de la humedad presente. Si el combustible está húmedo (h es el porcentaje de agua) interviene el concepto de poder calorífico inferior útil (PCIu) que, aproximadamente, equivale a:

$$PCIu = PCI \cdot (1 - h) - 600 \cdot h$$

Así, tomando un fango con un PCI de 3.500 kcal/kg, los respectivos PCI útiles serán:

- Para el fango del 90% de sequedad: PCIu = 3.090 kcal/kg.
- Para el fango del 50% de sequedad: PCIu = 1.450 kcal/kg.

Es obvio que, en el segundo caso, al introducir en el horno una energía menor por unidad de masa, la temperatura alcanzada será menor, que era precisamente el objetivo perseguido en el caso de la incineración de fangos en el reactor de lecho fluidizado.

El proceso de generación de fangos proporciona una especial caracterización a éstos, ya que:

- Incrementa la materia orgánica, concentrando la materia dispersa en el agua del fango.
- Incrementa el P y el N, ya que estos elementos y compuestos no suelen ser solubles.
- Disminuye el S (de los sólidos).

En contraste con el cálculo del PCI deducido a partir del análisis elemental de los fangos, la Tabla 12.16 reproduce el análisis inmediato donde se muestra el comportamiento del fango cuando se asimila a un combustible convencional. En contraparti-

Tabla 12.16. PCI de algunos fangos de EDAR

Tipo fango	Materia volátil (%)	C Fijo (%)	Ceniza (%)	Kcal/kg
Digerido P + S	50,5	11,7	37,6	3.461
Digerido P + S	57,5	11,9	30,4	4.009
Digerido P + S	47,3	10,7	41,9	3.292
Digerido P + S	59,6	12,8	27,4	4.294
Sin digerir P + S	61,6	9,3	28,7	3.966
Sin digerir P + S	44,8	7,6	47,5	2.717
Sin digerir P + S	69,7	8,3	22,1	5.500
Sin digerir P + S	70,7	17,5	11,7	4.656

da el análisis elemental permite calcular la cantidad de gases producidos en la oxidación del fango y la naturaleza de los mismos.

En la Tabla 12.16, la nomenclatura «Digerido P + S» significa: fango digerido con tratamiento primario y secundario. El término «Sin digerir» significa que no ha sido sometido a una etapa previa de digestión anaerobia. La tabla pone de manifiesto que el PCI de algunos fangos es superior al de ciertos combustibles convencionales, como los lignitos o los propios RSU, cuya naturaleza combustible nadie pone en duda.

La Tabla 12.17 corresponde a los mismos fangos, donde ahora se especifica el análisis elemental.

Tabla 12.17. Análisis elemental de algunos fangos de EDAR

Tipo	%C	%H	%N	%O	%Cl	%S
Dig. P + S	34,1	4,1	5,7	16,2	1	2
Dig. P + S	38,3	4,9	1,8	22,4	0,8	1,9
Dig. P + S	32,2	3,9	4,9	14,8	0,8	2
Dig. P + S	40,6	5,3	5,7	18,8	0,8	1,9
S/Dig. P + S	38	3,4	2,9	24,3	0,8	—
S/Dig. P + S	27,9	4	2	18,3	0,5	0,1
S/Dig. P + S	50	7	4,8	15	0,1	0,9
S/Dig. P + S	45,6	6,4	4,1	11,7	—	0,7

La digestión anaerobia de los fangos reduce la cantidad de volátiles y, lógicamente, aumentan los inertes, llegando a complicar el empleo del fango como combustible, como sucede con muchos fangos procedentes de la industria química. El análisis típico de un fango de EDAR, sobre base seca, es:

- C 53,0%; H 7,7%; O 35,5%; N 5,5%; S 0,8%
- Contenido en cenizas: 37%
- PCI: 5.100 kcal/kg

En la Tabla 12.18 se exponen los parámetros más representativos de diferentes tipos de fangos, siempre referidos a la base seca.

Tabla 12.18. Especificaciones de fangos de EDAR

Tipo de fango	% de combustible	PCI kcal/kg
Fango primario de EDAR	—	5.280
Ídem digerido anaeróbiamente	—	3.060
Primario (precipitación química)	—	3.920
Fracción grasas y espumas	88	9.280
Sólidos precipitados químicamente	57	4.150

5.1. LA ESTRUCTURA ENERGÉTICA DEL FANGO

Existen infinidad de fangos de EDAR y gran variedad de sistemas de tratamiento, lo que se traduce en que la caracterización del fango suele ser muy variable, como han puesto de manifiesto las tablas anteriores. Para proponer un ejemplo más amplio se toma un fango de las características que aparecían en la Tabla 12.4.

La caracterización racional del fango de EDAR debería espolear a los técnicos especializados en el diseño de depuradoras para que el funcionamiento de las mismas permitiera la segregación de las diferentes fracciones a lo largo del proceso. Es decir, un fango rico en proteínas y lípidos, como sería el resultante de un matadero industrial, tendría que destinarse a la obtención de biodiésel, una vez esterificado. Esta aplicación resulta mucho más interesante y económica que la solución convencional.

El fango correspondiente a dicha Tabla 12.4 se compone, a su vez, de un 50% de primario y el resto de biológico y procede de la mezcla de dos fangos de ciudades industriales de las cercanías de Barcelona. Se halla descrito en las formas (proteínas, lípidos, etc.) que ayudan mejor a comprender su transformación de acuerdo con el sistema de conversión energético elegido, en particular los sistemas bioquímicos o de baja temperatura.

Sin embargo, desde el punto de vista de la conversión energética termoquímica, que constituye la temática que se pretende desarrollar, la caracterización se expresa en otros términos: microorganismos, lignocelulósicos, etc. De hecho, si bien biológicamente es correcta la descripción anterior, el fango contiene microorganismos que son una mezcla de proteínas, carbohidratos y lípidos. No obstante en las «equivalencias de conversión» hay algunas modificaciones

biológicas; ello explica que los valores de la Tabla 12.19 sean ligeramente diferentes a los anteriores.

La tercera columna de la Tabla 12.19 indica el PCI útil considerando en el fango una única fracción. Es decir, si el fango estuviera formado por un 100% de microorganismos, su PCI útil sería de 2.262 kcal/kg. La cuarta columna se calcula multiplicando el PCI útil de cada fracción por su porcentaje en peso.

De esta manera, si la Tabla 12.4 ayuda a la comprensión de la biodegradabilidad, la Tabla 12.19 interpreta mejor los fenómenos de conversión energética termoquímicos. La relación siguiente está extraída de la USEPA (1979) y, aunque antigua, da una cierta idea del cambio de constituyentes entre un fango primario (FP) y otro activado (FA):

- Materia sólida total MS (%)
  2-7 (FP) 0,4-1,5 (FA)
- Sólidos volátiles (%)
  60-80 (FP) 60-80 (FA)
- Grasas totales (% sobre MS)
  7-35 (FP) 5-12 (FA)
- Proteínas totales (% sobre MS)
  20-30 (FP) 32-41 (FA)
- Celulosas totales (% sobre MS)
  9-13 (FP)

Lo normal en las EDAR son los fangos activados procedentes de una mezcla de primario y secundario.

Tabla 12.19. Estructura energética de los fangos

ESTRUCTURA ENERGÉTICA DEL FANGO				
Fracción	**% peso**	**PCI útil**	**kcal/kg**	**kW/kg**
Microorganismos	40%	2.262	905	1.05
Grasas y aceites	15%	8.448	1.267	1,47
Lignocelulósicos	10%	3.741	374	0,44
Inertes	35%	—	—	—
Total	100%		2.546	2,96

6. La biodegradabilidad

Se define así la susceptibilidad de una sustancia a ser descompuesta por microorganismos. Específicamente, es la velocidad a la cual las bacterias y/o factores naturales del medio ambiente pueden descomponer químicamente determinados compuestos como la materia orgánica, detergentes, pesticidas, etc.

Ensayos y tests llevados a cabo en cierto número de compuestos han arrojado los resultados siguientes:

- Fácilmente biodegradables: n-propanol, etanol, ácido benzoico, benzaldehído, acetato de etilo.
- Menor biodegradabilidad: etilenglicol, isopropanol, ortocresol, dietilenglicol, piridina, trietanolamina.
- Resistentes a la biodegradabilidad: anilina, metanol, monoetanolamina, metil-etil cetona, acetona.

Así, tal como se describía en la Tabla 12.4, la biodegradación de las proteínas es mucho más lenta y complicada que la de los lípidos y fibras. De todas maneras, en el caso de los lípidos, las largas cadenas de los ácidos grasos son muy difíciles de degradar.

6.1. TIPOS DE RESIDUOS FERMENTABLES

Dentro de los llamados residuos orgánicos existe una infinidad de variedades sobre los que convendría llevar a cabo una breve clasificación, puesto que la mayoría de ellas de una u otra forma se hallan presentes en los fangos de EDAR.

6.1.1. Residuos fácilmente fermentables

Denominados «*soft organics*» en terminología inglesa, son la FORM (fracción orgánica de los residuos municipales) estrictamente. Corresponden a aquellas estructuras en que el principal componente celular es el agua, es decir, los vegetales: frutas, verduras y restos de jardín (en particular los de césped), hojas y raíces.

A lo largo del tiempo se establece una interacción entre el agua celular y la de humedad; así, al iniciarse el proceso de descomposición, el agua de constitución se transforma en agua de humedad. Esto mejora los parámetros de compostaje, si bien empeoran las condiciones de transmisión de patógenos. Todos ellos presentan ciertas dificultades para su compostaje derivadas de la pérdida de humedad que deben ser superadas mediante las condiciones de operación, recirculación de los lixiviados o adición de agua.

6.1.2. Residuos difícilmente degradables

También llamados «*hard organics*» en terminología inglesa. Técnicamente son aquéllos en que la rela-

ción de agua celular con respecto la masa total es muy inferior a los anteriores. En los procesos de compostaje prácticamente no dan lugar a lixiviados y desprenden pocos COV's (que se traducen en malos olores), si bien precisan agua externa para el proceso.

Ejemplos típicos de este grupo son los restos de poda incluyendo hojas frescas.

6.1.3. Materiales celulósicos

La estructura celular de estos materiales está formada básicamente por lignina y/o celulosa y contienen poca agua celular. Muchos de ellos presentan una descomposición muy lenta o casi nula en presencia de bacterias. Ciertos hongos producen una rápida fermentación pero esta clase de microorganismos no resiste bien la temperatura.

A esta clase pertenece la paja, restos de madera, papel, hojas secas, etc.

6.1.4. Residuos de animales

Los residuos ricos en proteínas se descomponen rápidamente. Así, la sangre de animales, los productos lácteos o los restos de aves se degradan con gran rapidez. Sin embargo, el proceso desprende muy mal olor y las sustancias generadas pueden inhibir los procesos de compostaje; por esta razón sólo deben ser tratados en los sistemas de digestión anaerobia.

6.1.5. Residuos de deyecciones humanas y del ganado

En primer lugar debería hacerse una distinción previa entre los residuos procedentes de animales carnívoros y los herbívoros. Los primeros, donde hay que incluir los procedentes de los humanos, contienen gran cantidad de gérmenes patógenos y organismos parasitarios. Desde el punto de vista de los residuos, a este grupo corresponden los fangos de las depuradoras urbanas (EDAR), que si bien son una buena fuente de nitrógeno y materia orgánica, suponiendo que estén exentos de metales pesados, hay que garantizar su higienización para el posterior uso.

Los residuos procedentes de los animales herbívoros son bien diferentes a los anteriores, pues contienen muy pocos agentes patógenos y parásitos, por lo que constituyen una buena fuente de nitrógeno para el compost. Por otra parte, su contenido proteico no es lo suficientemente importante como para generar malos olores. Desde el punto de vista del reciclaje el problema que presentan es su consistencia acuosa, en parte motivada por los sistemas de recogida, que recuerda un fango primario de EDAR.

6.1.6. Los Fangos de EDAR

Son de hecho una mezcla de residuos en los que, en mayor o menor cantidad, se hallan presentes todas las tipologías antes descritas. El análisis de conversión energética de un fango de EDAR está basado precisamente en la biodegradabilidad de las diversas fracciones que lo integran.

6.2. PROPIEDADES BIOLÓGICAS DE LOS FANGOS

Desde el punto de vista químico, la fracción orgánica de los fangos de EDAR, excluyendo el plástico, la goma y el cuero, materiales no aptos para los sistemas aquí tratados, pueden clasificarse como:

- *Constituyentes solubles en agua:* como azúcares, féculas, algunos ácidos orgánicos y aminoácidos. Esta propiedad es fundamental para la biodegradabilidad y por el impacto que puede provocar cuando se deposita en un vertedero.
- *Productos celulósicos.* Son componentes típicos del papel y la madera, no obstante no siempre provienen de ella. La hemicelulosa es un producto de síntesis de azúcares que contiene cinco carbonos, mientras que la celulosa está formada por seis. Esta diferencia hace a la celulosa, mayoritaria en la madera, de más difícil degradación.
- *La lignina.* Se trata de un típico componente del papel y la madera. Es un polímero que contiene anillos aromáticos con grupos metoxi ($-OCH_3$), cuya fórmula final no es bien conocida. La lignocelulosa es una combinación de la celulosa y la lignina. De los componentes habituales, la lignina es la menos biodegradable.
- *Grasas y aceites.* Productos típicos de la fracción residual de la comida. Muchos de ellos no son fermentables. La mayoría son ésteres de alcoholes y ácidos grasos de cadena larga.
- *Proteínas.* Formadas básicamente por cadenas de aminoácidos. Algunas de ellas de difícil biodegradabilidad.

La propiedad más sobresaliente desde la óptica de la valorización es que casi todos los componentes

presentes pueden ser convertidos biológicamente en gases y sólidos orgánicos e inorgánicos razonablemente inertes.

6.3. TAMAÑO DE PARTÍCULA Y BIODEGRADABILIDAD

Las operaciones unitarias y los procesos bioquímicos que intervienen en la eliminación de la materia orgánica, tales como sedimentación, coagulación, filtración, transferencia de masa, adsorción, difusión y reacciones bioquímicas se ven afectadas por la concentración de partículas, por tanto, la distribución granulométrica de las mismas es un hecho que afecta al desarrollo de los procesos en los que intervienen.

La Figura 12.22 reproduce algunos de los contaminantes habitualmente presentes en las aguas residuales. En los países industrializados, las aguas residuales, contienen una cantidad de contaminantes con un rango de tamaño entre 0,0001 y 100 mm, lo que les confiere una gran variabilidad.

Durante el tratamiento biológico se modifica la distribución de la materia orgánica en las aguas residuales. Si estos cambios, durante el proceso de tratamiento, se pueden cuantificar será posible establecer mecanismos para controlar las reacciones de eliminación de los contaminantes. Por consiguiente, la determinación y evolución del tamaño de partícula de los contaminantes deviene un factor importantísimo para desarrollar, seleccionar y evaluar el sistema de tratamiento más adecuado.

De manera resumida y de acuerdo con la Figura 12.22, el tamaño de los contaminantes habituales en las aguas residuales, se puede clasificar en:

- Sedimentables: partículas mayores de 100 mm.
- Supracoloidales: partículas mayores de 1 mm y menores de 100 mm.
- Coloidales: partículas mayores de 0,08 mm y menores de 1 mm.
- Disueltas: partículas menores de 0,08 mm.

6.3.1. Distribución de la DQO según el tamaño de partícula

Para estudiar el fraccionamiento de los diversos contaminantes orgánicos a lo largo del proceso de digestión anaerobia se ha de calcular el tanto por ciento de DQO con respecto a la DQO total de cada una de las fracciones. De acuerdo con la nomenclatura de la Figura 12.23 es:

- DQO sedimentable (DQOs).
- DQO supracoloidal (DQOsc).
- DQO coloidal (DQOc).
- DQO disuelta (DQOd).

Al analizar los cambios de la figura, resulta que las diferentes evoluciones de la DQO tienen que ver con la actividad enzimática asociada a las bacterias. Así, a las dos semanas de digestión la fracción soluble se incrementa considerablemente y permanece en esta posición dominante hasta las tres semanas de digestión, circunstancia que coincide con la máxima

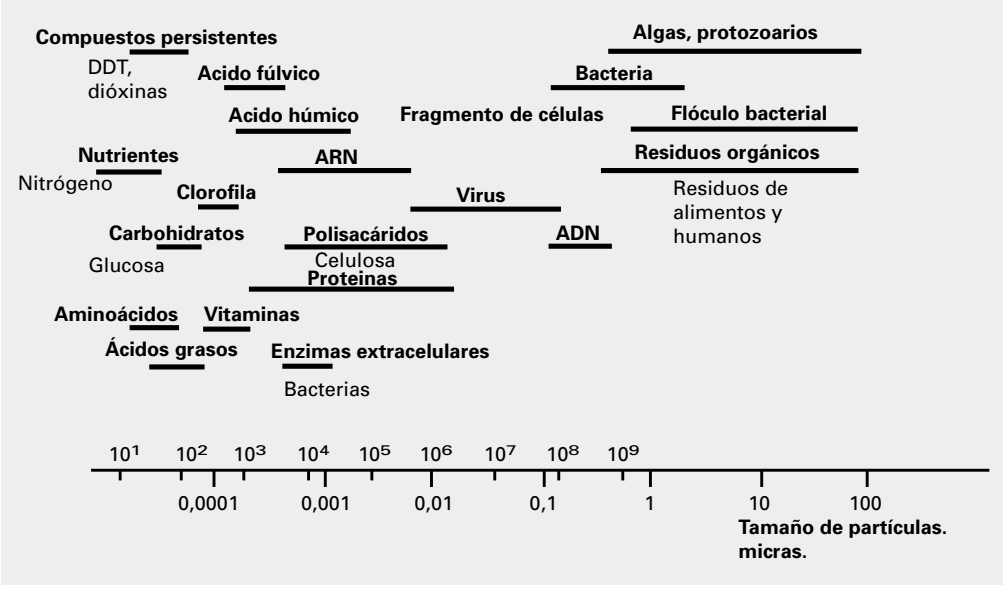


Figura 12.22. Constituyentes orgánicos habituales en las aguas residuales municipales.

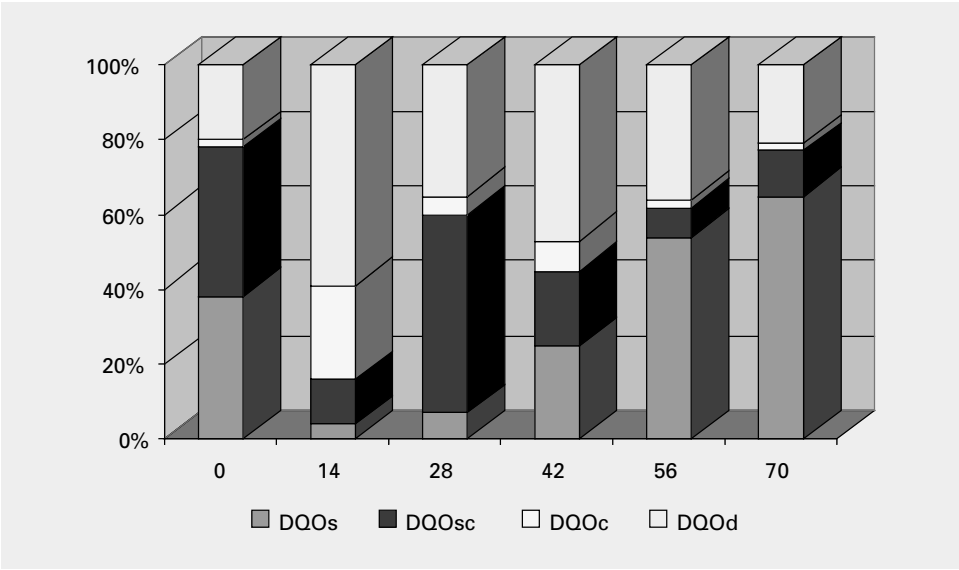


Figura 12.23. Distribución de la DQO según el tamaño de partícula en función del tiempo.

producción de metano. Este comportamiento confirma la hipótesis de un elevado crecimiento celular por no existir déficit de nutrientes y predominar la DQO soluble.

A medida que avanza el tratamiento, la fracción soluble disminuye y aumentan las fracciones coloidales y supracoloidales, lo que puede interpretarse como una hidrólisis del material celulósico. También el incremento de las fracciones coloidales y supracoloidales puede asociarse al crecimiento de la masa bacteriana. Los flóculos que forman las bacterias al producirse el proceso de digestión se encuentran en el rango de tamaño entre 1 y 100 μm.

Asimismo, la fracción coloidal entre 1 y 0,08 μm puede corresponder a una fracción rica en bacterias, ya que el tamaño mínimo para una bacteria se considera que está entorno a las 0,45 μm.

En resumen, se puede concluir que el proceso de digestión comienza por las partículas solubles y pequeñas, y las sedimentables, de gran tamaño, sufren poca o ninguna transformación. Paralelamente esta es la fracción que aporta mayor DQO con respecto a la DQO total.

6.4. PROBLEMÁTICA PARTICULAR DE LOS FANGOS A LOS TRATAMIENTOS

Al fango una vez deshidratado se le presta poca atención, ya que el destino habitual es la aplicación al suelo o el vertido. En los últimos tiempos debido a la proliferación de secados térmicos han surgido los siguientes problemas:

- Las plantas de secado térmico, en especial las que tratan fangos mezclados procedentes de diversas EDAR, no alcanzan la producción real para las que han sido diseñadas.
- En los diversos procesos se presentan una serie de problemas poco conocidos, como la presencia de fibras largas, la gran generación de volátiles, el diferente comportamiento de un fango a otro, que se traduce en un rendimiento muy diferente de la evaporación de agua, etc.

En párrafos anteriores se ha caracterizado el fango de EDAR, pero siempre de manera parcial, es decir, se ha descrito el análisis químico, algunas veces el denominado análisis racional, pero no se ha hablado del comportamiento intrínseco de la forma en que los diversos componentes del fango interactúan y dan como resultado una serie de anomalías que se ponen de manifiesto precisamente en el último proceso, el secado térmico.

La Figura 12.24 intenta reproducir una analogía del comportamiento de las arcillas durante el proceso cerámico, en comparación con lo que acontece con los fangos de EDAR a lo largo de su proceso térmico.

En el proceso cerámico, las arcillas, a diferencia de los fangos, tienen una caracterización abrumadoramente inorgánica. No obstante, es difícil encontrar en la naturaleza una arcilla que presente una mineralogía que se adapte al proceso, o producto que se pretende fabricar, por ello se debe recurrir a una mezcla de arcillas (A1, A2, A3, etc.). A la caracteri-

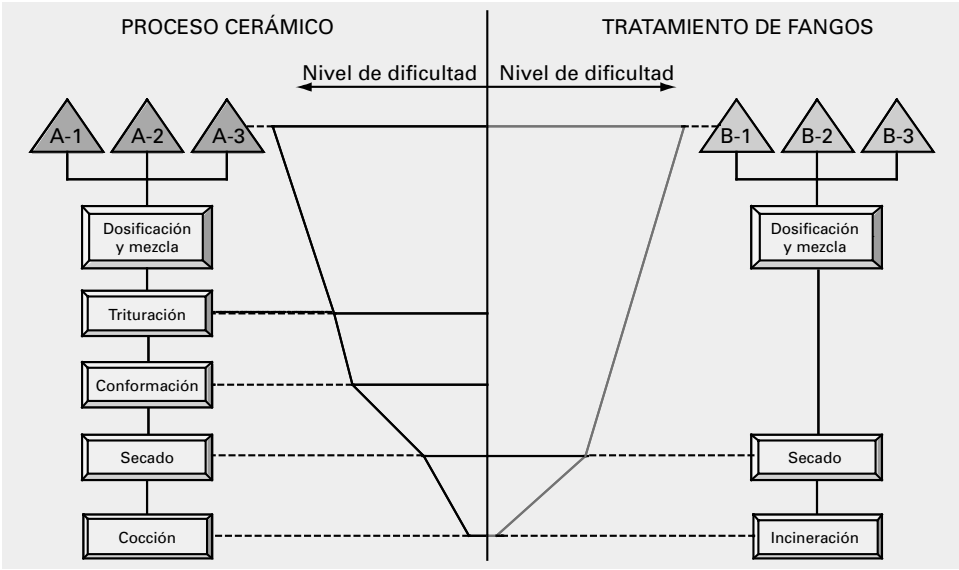


Figura 12.24. Analogía de proceso entre la cerámica y el fango de EDAR.

zación de la naturaleza de las materias primas se le asigna el mayor grado de dificultad. A partir de ahí, los pasos esenciales son:

- *Dosificación y mezcla de las diferentes arcillas*.
- *Trituración*. Para fabricar cualquier tipo de cerámica es preciso llevar a cabo una trituración que tiene por finalidad poner de manifiesto un cierto grado de plasticidad que permita el posterior conformado. Es importante distinguir entre el tamaño de la partícula que resulta de la trituración y el tamaño de grano intrínseco, que depende de la naturaleza del mineral determinado. Así una arcilla illitica común, cuyo tamaño de grano es del orden de la micra, se encuentra en la naturaleza en forma de grandes terrones que es preciso triturar para usarla en la fábrica. Finalmente, se debe conocer la distribución granulométrica, es decir el número de partículas de una determinada medida, de manera que proporcionen una densidad de empaquetamiento y compactación máxima.
- *Conformación*. Se añade una determinada cantidad de agua a la masa cerámica para facilitar el moldeo, o conformación, ya sea por prensado, colado, extrusión, etc. Y obtener la forma geométrica deseada.
- *Secado*. Es la operación donde se elimina el agua que se le había adicionado en el proceso anterior, y también la que contenía la materia prima.
- *Cocción*. Operación final donde se desarrollan las diversas reacciones fisicoquímicas (una de estas reacciones es la eliminación del agua de cristalización de los minerales de arcilla), a alta temperatura, que caracterizan el material cerámico. Obsérvese que la dificultad de esta etapa, la más emblemática de todo el proceso, es mínima.

En el eje de abscisas de la Figura 12.24, la longitud de los segmentos horizontales, quiere representar el grado de dificultad de cada uno de los pasos intermedios del proceso. Así, en la comparativa, el nivel de dificultad, en ambos casos son las «materias primas». El corolario es inmediato: la fase que presenta menos problemas es la cocción en el caso de la cerámica o la incineración en el tratamiento de fangos.

Siguiendo con la analogía, en el caso de los fangos:

- Muy raramente se conoce la mineralogía (fracción inorgánica de los fangos) y la caracterización de la parte orgánica. También es frecuente desconocer el análisis químico de los fangos.
- No suele llevarse a cabo una mezcla. Los diversos fangos (B1, B2 o B3) a medida que llegan a planta se introducen en la tolva y se procesan por separado.
- Los fangos ya vienen «triturados», es decir por su origen, materiales disueltos o en suspensión y la formación de coágulos, son partículas de tamaño pequeño, sin embargo no se conoce la distribución de tamaño y por tanto las características que ello conlleva.
- Los problemas que aparecen en la fase de secado suelen estar ocasionados por la naturaleza

del fango. Por ejemplo, si la materia orgánica contiene mayor cantidad de coagulante, es más densa (forma unas microbolas), más plástica y el secado es mucho más difícil. Por lo general, el agua libre es relativamente fácil de eliminar pero el agua celular (la equivalente al agua de cristalización en los minerales de arcilla) está fuertemente ligada y es preciso aplicar una energía supletoria para su eliminación.

- Si se procede a un tratamiento térmico de eliminación de la materia orgánica: gasificación o incineración, las dificultades presentes son mínimas, muy inferiores a su «homóloga» cerámica, puesto que aquí no se trata de mantener una determinada forma geométrica, ni dimensión alguna.

Los fangos tienen un comportamiento reológico complejo. Las mezclas materia inorgánica, materia orgánica y agua tienen unas propiedades de flujo muy dependientes de la naturaleza de sus ingredientes. Así, si la cantidad de materia orgánica es variable de un fango a otro y no se introduce ningún corrector, su comportamiento en secado va a ser muy diferente, o lo que es lo mismo, si un fango se comporta razonablemente bien en secado, el siguiente no funcionará. Ello se pone claramente de relieve en los secadores de «capa fina» donde en la primera zona el fango tiene un comportamiento plástico que es imprescindible para ser proyectado contra la pared interna del tambor. En la segunda zona, la central, el fango se torna más viscoso y comienza a romperse en partes pequeñas que siguen adheridas a la pared interna. En la última zona comienza el desprendimiento, el vapor de agua generado ayuda a la expulsión, y a la aparición de polvo. Al menos, las propiedades del fango deberían propiciar este comportamiento.

En términos reológicos se podría decir que el fango se comporta como un fluido tixotrópico a la entrada del secador, para pasar a una etapa de alta viscosidad en la zona central y acabar perdiendo el agua, lo que lo convierte en polvo. Es obvio que el comportamiento no va a ser el mismo si las características del fango entrante no son las mismas y, técnicamente, no será justo achacar al secador el mal funcionamiento de la instalación. En este sentido es preciso llevar a cabo una gran labor de investigación aplicada.

7. Valorizaciones energéticas

La valorización energética es el proceso de recuperar el calor sensible contenido en los gases. Es obvio que la tecnología de valorización y/o combustión será diferente, y su rendimiento también, según el proceso de valorización empleado.

En la pirólisis el sólido entrante se convierte en gas (alrededor del 20%, según el residuo y el proceso) y el resto son aceites pirólíticos y coque que deberán ser incinerados para liberar el calor.

El caso de la gasificación es bien diferente. Si todo es correcto, el 100% de la materia orgánica se ha transformado en gas. Ahora sólo se trata de depurarlo para poder oxidarlo. El proceso más lógico, desde el punto de vista del mayor rendimiento energético, es depurar y oxidar el gas de síntesis en un motor de cogeneración. Si se hace al revés, siguiendo un ciclo de Rankine, primero se oxida, luego se recupera el calor y, al final, se depura.

En la incineración, al ser el fango un «todo-uno» compuesto por una fracción orgánica, otra inorgánica y agua, la valorización energética deberá partir de las siguientes premisas:

- Que el fango sea autocombustible. La parte orgánica de los fangos de EDAR no digeridos tienen un PCI (poder calorífico inferior) próximo a los 5.500 kcal/kg (23.012 kJ/kg). Si, aproximadamente el 50% es materia orgánica el PCI real será de 2.750 kcal/kg (hay que hacer constar que el 50% de inorgánico no computa a efectos del PCI). Con estos valores los fangos son perfectamente autocombustibles.
- El parámetro que sí puede afectar a la autocombustibilidad es la humedad. El PCI de un combustible siempre se refiere a la fracción seca del mismo. No obstante, la humedad presente obliga a gastar tal cantidad de energía en la evaporación del agua que podría darse el caso de que un fango húmedo no mantuviese la autocombustión. De esto se colige que existe una cantidad de humedad que hace inviable los procesos de conversión energéticos termoquímicos. Para una óptima utilización de la energía, la humedad del fango entrante en el proceso debe estar entre ciertos límites.

En este último factor, la humedad del fango hace pivotar la viabilidad de los diversos tratamientos de valorización energética de los fangos de EDAR. Estos procesos también se podrían catalogar como:

- Procesos integrales de residuo cero.
- Procesos térmicos con residuo secundario.

Este apartado hace referencia al esquema inicial desarrollado en la Figura 12.2.

7.1. LA INCINERACIÓN DE LOS FANGOS

La incineración es, en realidad, un conjunto de tecnologías entre las que cabe destacar la combustión, puesto que es la que afecta más directamente a la fracción orgánica de la materia que se pretende tratar. Así, la Tabla 12.20 muestra de manera esquemática la clasificación de los procesos convencionales dentro de los tratamientos térmicos.

Tabla 12.20. Clasificación de tratamientos térmicos y procesos que intervienen

Etapas	Método de tratamiento			
	Secado	Pirólisis	Gasificación	Combustión
Etapa 1	Secado	Secado	Secado	Secado
Etapa 2		Pirólisis	Pirólisis	Pirólisis
Etapa 3			Gasificación	Gasificación
Etapa 4				Oxidación

Los combustibles sólidos y líquidos deben pasar por una fase previa de gasificación para que se desprendan los volátiles. Las reacciones de combustión siempre tienen lugar en fase gaseosa (reacciones homogéneas). Existen reacciones heterogéneas (sólido-gas) que tienen una cinética mas complicada y, desde el punto de vista ambiental, son mucho más conflictivas. Estas conversiones se llevan a cabo en la práctica por medio de una serie de procesos elementales entre los que cabe citar:

- El secado: donde se evapora el agua contenida en el combustible.
- La destilación: proceso en el que se escapan los primeros COV's, que se transforman en los primeros gases combustibles.
- La gasificación y la pirólisis, que obviamente aparecen ya que zonas del combustible se hallan expuestas al calor con un aire inferior al estequiométrico (gasificación) o simplemente sin aire (pirólisis).
- La oxidación de los gases resultantes para dar finalmente CO_2 y H_2O.

De todo ello se pueden extraer, en primera aproximación, una serie de características que deben tener los hornos más apropiados para incinerar fangos:

- En primera etapa se debe favorecer la destilación y gasificación, ya que es la forma correcta de iniciar el proceso de conversión energética. Para ello se precisa un nivel térmico elevado. Se recomienda no alcanzar los 900 ℃, ya que a partir de este valor puede haber peligro de fusión de cenizas, en especial si se emplea un horno de lecho fluidizado.
- No es conveniente trabajar con mucho aire primario, lo único que hace un exceso de aire es enfriar el horno y favorecer el arrastre de material particulado. En el caso de los fangos de EDAR la propia humedad ayuda a mantener la temperatura dentro de los límites previstos.

La Figura 12.25 muestra el esquema de un reactor de lecho fluidizado para la incineración de fangos de EDAR. Como se ha comentado anteriormente, si se elige la modalidad de incineración, o gasificación, en lecho fluidizado, la temperatura interna no puede sobrepasar los 900 ℃.

La problemática de la incineración de fangos de EDAR estriba en que estos poseen una cantidad importante de cenizas fusibles entre 1.100 y 1.300 ℃, sin embargo, entre ellas hay cantidades importantes de componentes, como NaCl, Na_2CO_3 o Na_2SO_4, con puntos de descomposición entre 750 y 850 ℃. En estas circunstancias el peligro consiste en alcanzar la temperatura de descomposición de sales de sodio, potasio y alcalinotérreos antes que la de descomposición de la materia orgánica. La razón se encuentra en que la presencia de óxidos fundentes, como los alcalinos, a temperaturas de 950 ℃ van a hacer fundir el resto de cenizas y parte de la estructura metálica del propio horno. Por esto, en algunos hornos, junto al fango de EDAR se añade alúmina y cuarzo (compuestos refractarios).

En el DVD adjunto, en el punto 4, se muestra información suplementaria sobre sistemas de incineración de fangos.

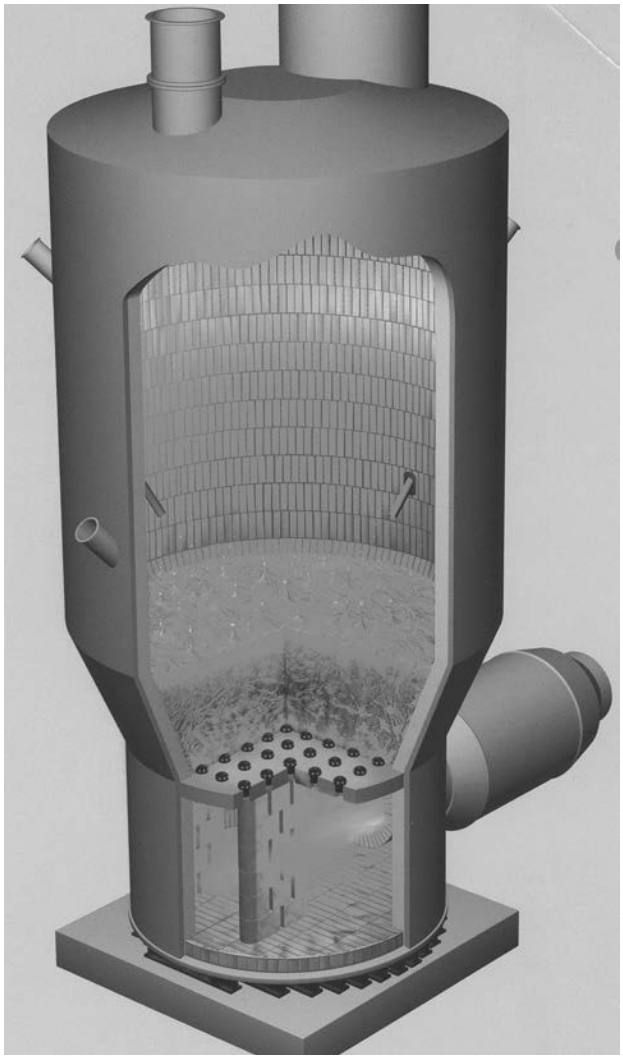


Figura 12.25. Esquema de un reactor de lecho fluidizado para incineración de fangos.

7.1.1. Las etapas para una correcta incineración

Los productos que salen del horno son:

- Gases, abrumadoramente oxidados, mayoritariamente CO_2 y H_2O. Sin embargo, debido a la superposición de los procesos antes indicados, también están presentes nuevos gases combustibles como H_2, CO, CH_4, etc., como resultado de las complicadas reacciones que tienen lugar en el horno.
- Por otro lado hay que tener en cuenta que, con independencia del exceso de aire usado, a la salida de los gases del horno se detecta la presencia de productos de la combustión incompleta o compuestos intermedios de la combustión (CIC), que suelen ser más tóxicos que los combustibles primarios. (Todo ello se produce con independencia del combustible usado).
- Cenizas volantes, arrastradas por la corriente de gas. En el caso de los fangos de EDAR el arrastre de material particulado es máximo puesto que, aproximadamente, el 40% del fango es incombustible.

Para llevar a cabo un correcto tratamiento térmico, la instalación de incineración ha de estar compuesta de:

- *Horno o reactor:* donde la materia orgánica sólida o líquida se transforma en gas. Un parámetro importante es el tiempo de residencia de sólidos en el interior del reactor para minimizar la carga orgánica residual de las cenizas.
- *Cámara de oxidación:* todos los gases producidos en el horno contienen una parte significativa de los mismos que no han resultado oxidados y son, por tanto, combustibles. La cámara de oxidación tiene como finalidad permitir la inyección de una ligera cantidad de aire (aire secundario) para oxidar completamente los gases. Este aire representa un cierto exceso sobre el estequiométrico, no obstante aplicado de esta manera es mucho más efectivo que si se inyecta en el horno como aire primario.
- *Cámara de postcombustión:* pese a la presencia de la cámara de oxidación, la eliminación de los compuestos orgánicos de elevado peso molecular persiste y ellos son los más peligrosos desde el punto de vista ambiental. En esta cámara los gases oxidados permanecen un mínimo de 2 segundos a elevada temperatura (entre 850 y 1.100 ℃) según el tipo de residuo.

Es en esta última cámara donde se produce la verdadera destrucción térmica de los compuestos orgánicos remanentes. En primer lugar un tiempo prolongado a elevada temperatura hace vibrar y desestabilizar los enlaces de los grandes macromoléculas hasta que se rompen. De hecho se transforman en hidrocarburos simples muy fáciles de oxidar a partir del exceso de oxígeno presente.

A partir de esta cámara los gases se dirigen a la caldera de recuperación, para valorizar el calor sensible de los mismos y, finalmente, a la etapa de lavado y tratamiento. Debería quedar claro que en la hipótesis de que el combustible fuese únicamente orgánico (que es lo que debiera acontecer), los gases

se podrían emitir directamente a la atmósfera. Sin embargo, los fangos de EDAR contienen una gran cantidad de materia incombustible y otros contaminantes que de una manera u otra se deben neutralizar y recuperar, de ahí la necesidad del tratamiento de los gases que, si se hace correctamente la emisión, no supone ningún peligro ambiental.

Desde el punto de vista de la valorización energética, la gran ventaja de la incineración es que, al generar energía, el coste de tratamiento de los fangos de EDAR se reduce. En el caso de la incineración, admitiendo que el rendimiento del conjunto horno-caldera sea del 85% (este valor depende básicamente de la temperatura a la cual se vierten los gases a la atmósfera y de las pérdidas de calor a través de las paredes), y el de turbina de vapor-alternador del 22% (este valor también depende del grado de recalentamiento del vapor y de la magnitud de la turbina, cuanto mayor sea mayor rendimiento y del sistema de funcionamiento de la turbina), el conjunto arroja un rendimiento global próximo al 20% (el rendimiento va en aumento con el tamaño de la planta y las características de la caldera). Este rendimiento está expresado en términos de energía térmica aportada por el combustible con respecto a la energía eléctrica disponible en bornes del alternador.

Pese al pobre rendimiento de la conversión energética, ésta parece que es la vía preferida de los países centroeuropeos y cuando dispone de una completa línea de tratamiento de gases, no implica ningún riesgo ambiental.

7.1.2. Sistemas de coincineración con fangos de EDAR

La coincineración trata de sacar el máximo provecho a un combustible relativamente pobre, como es el caso de los fangos de EDAR, al mezclarlo con otro de mayores posibilidades energéticas, es decir, de los denominados convencionales y/o fósiles.

Este sería el caso de la planta de fabricación de papel Chonju Paper Plant, en Corea del Sur, donde desde 1988, el fango de EDAR seco se mezcla con corteza de árbol, de la misma madera usada para la fabricación de la pasta de papel, y se incinera conjuntamente en un reactor de lecho fluidizado. Las cenizas generadas, tanto por el fango como por la corteza, son extraídas del sistema conjuntamente. Ambos residuos contienen cloro y ello es un parámetro que debe ser controlado constantemente: En el caso de incinerarse en un horno de bandejas la agresión de los vapores halogenados destruye el horno, mientras que en el lecho fluidizado se inyecta carbonato cálcico para la neutralización del cloro en el propio reactor.

En Alemania, y en otros países de la UE, se usa la coincineración de los fangos de EDAR con los RSU. Básicamente se emplean dos tecnologías:

- Horno multibandejas. Como el existente en Fürth (Baviera, Alemania) donde se incineran RSU con un 20% de fangos de RSU, con una capacidad total de 100.000 t/año. Para ello el horno debe trabajar a baja temperatura, más bien en defecto de aire para producir gases de pirólisis y ser oxidados posteriormente. De hecho, el horno ha de funcionar como un pirolizador, a ello ayuda la gran inercia térmica que constituyen todas las bandejas. Por otra parte el acero se corroe, en particular por la presencia del cloro.
- Hornos individuales, como la planta Böblingen (Baden-Württemberg, Alemania), donde los fangos de EDAR son incinerados en un horno de lecho fluidizado, mientras los RSU lo son en un horno de parrillas, más o menos convencional. Los gases resultantes de la incineración de fangos se envían a la misma cámara de oxidación de la instalación de RSU, y luego siguen camino mezclados hacia la caldera de recuperación y la depuración de los gases.

7.2. LA VALORIZACIÓN DE LOS FANGOS DE EDAR EN HORNOS DE CLÍNQUER

El horno de clínquer es un buen candidato a incinerar, o coincinerar hablando con propiedad, casi todo tipo de combustibles orgánicos residuales, ya que cumple con los dos requisitos más importantes:

- Trabaja a alta temperatura. La temperatura mínima de proceso siempre es superior a los 1.250 ºC (no hay que confundir la temperatura media del proceso que es, a efectos prácticos, la que condiciona el comportamiento del residuo introducido con la temperatura de llama que puede sobrepasar los 1.800 ºC).
- El tiempo de residencia de los gases es elevado. Incluso partiendo de la base de que la volatilización y la gasificación es lenta (como acontece en el caso de los neumáticos) el tiempo de residencia sigue siendo alto, alrededor de los 8 segundos. Cuando los residuos se introducen

a la salida de los gases, el tiempo de residencia de los gases generados es muy bajo.

No obstante, la industria cementera impone ciertas limitaciones a las características de los residuos a valorizar, entre los que cabe resaltar:

- PCI mínimo de 5.000 kcal/kg.
- Contenido en H_2O < 1%.
- Sólidos en suspensión < 30%.
- N < 3%, S < 3%. Cenizas < 10%.
- Ba < 5.000 ppm, Cr < 1.500 ppm, Pb < 2.500 ppm.
- PCB's < 50 ppm. Halógenos < 5%.

Es evidente que los fangos de EDAR no cumplen con la mayoría de los requisitos antes mencionados. No obstante, desde el punto de vista técnico, no hay incompatibilidades reales en el caso de los fangos. De hecho es una práctica habitual en muchos países de nuestro entorno. En los momentos actuales, y debido a la problemática de esta industria a cumplir con el Protocolo de Kyoto, el fango de EDAR es uno de los combustibles alternativos buscados para la coincineración.

Como cualquier otro sistema de co-combustión, el enfriamiento de los gases es lento y se produce la «síntesis de novo», con la consiguiente reformación de dioxinas y furanos (la reformación de organoclorados es independiente del combustible sólido, o líquido, empleado). Existen numerosos estudios que atestiguan la presencia de organoclorados procedente de las emisiones de las plantas de cemento. Ello es lógico, ya que en esta industria no se añade carbón activo a la salida de los gases de combustión antes de su emisión a la atmósfera, por tanto esta industria debería llevar a cabo una inversión suplementaria para corregir estas emisiones.

En comparación con la vitrificación, e incluso la ceramización, la cantidad de fase amorfa que se forma durante el proceso de clinquerización es muy limitada. Las reacciones de clínquerización tienen lugar, mayoritariamente, en fase sólida y por tanto la posibilidad de que los metales volátiles o semivolátiles queden retenidos por enlaces químicos en la matriz es muy baja. Por otra parte, los metales refractarios difícilmente son integrados en el proceso de clinquerización. Lo normal es que alguno de los óxidos quede adsorbido en el propio clínquer.

Las reacciones en estado sólido presentan una cinética muy lenta y ello ha de compensarse con un aumento de la temperatura. Así, mientras una cerámica convencional (ladrillería) se consigue a temperatura próxima a los 1.000 ℃, un horno de clínquer sobrepasa los 1.300 ℃. La temperatura exacta de trabajo, al igual que acontece con las materias primas, dependerá de las materias primas disponibles.

Si bien no existen problemas importantes en la coincineración de residuos de naturaleza orgánica, como los fangos de EDAR en los hornos de clínquer, ambientalmente los impactos pueden sintetizarse en:

- *Elevados consumos energéticos*. No solamente procedentes de la combustión del combustible, mayoritariamente fósil, sino por la descomposición de la propia materia prima que da como resultado el CO_2. Con la aplicación del Protocolo de Kyoto, estos problemas se agravarán de manera importante. Solamente en términos de consumo energético, la factura representa el 30% de los costes de fabricación, por lo que el empleo de combustibles alternativos está muy solicitado.
- *Gases ácidos, metales y partículas*. Entre los primeros cabe destacar los NOx procedentes del nitrógeno (muy abundante en los fangos de EDAR) presente en combustibles y materias primas y, sobre todo, los de origen térmico debido a las altas temperaturas de proceso. Los SOx, casi siempre presentes en los fangos de EDAR, proceden también del combustible, caso del fuelóleo, o bien de las materias primas (sulfatos y sulfuros; el SOx procedente del sulfuro es más difícil de capturar por el propio clínquer). Los metales están omnipresentes en todas las materias primas y combustibles, no obstante su impacto se puede ver potenciado por la incorporación de ciertos residuos.

Los acuerdos de reducción de contaminación voluntarios, firmados por las empresas de producción de cemento, y la progresiva eficacia de los filtros reducen su impacto, cuyo principal vector es el material particulado.

7.2.1. El problema del cromo VI en los cementos

La proclamación de la Directiva europea referente a la calidad de los cementos obligó, desde 2005, a la reducción de la presencia de cromo hexavalente en los cementos debido a los efectos nocivos que pro-

voca. En concreto se, la venta y el uso de cementos que contengan más de 2 ppm de cromo VI.

En general, la especie más abundante en las materias primas es cromo III, que en el proceso de sinterización se oxida debido a la presencia de aire, a cromo VI y de ahí pasa al cemento. Así, el cromo trivalente, aunque más nocivo que el hexavalente, produce menos problemas sanitarios debido a su escasa solubilidad y capacidad de penetración en la piel.

La conexión del cromo con la gestión de los fangos es casi segura. Por una parte, el cromo está presente en los fangos como contaminante y por tanto está asegurada su transformación a cromo VI. Desde el punto de vista de la valorización, el sulfato de hierro (subproducto) es un buen aditivo para la reducción del cromo VI y con ello minimizar su efecto perjudicial en el cemento.

7.3. VALORIZACIÓN DE FANGOS EN CENTRALES TERMOELÉCTRICAS

Se trata de una práctica consistente en mezclar el fango de EDAR con el combustible convencional y alimentar la caldera de una central térmica. Se comenzó a usar en Alemania a partir de la premisa de que el PCI de muchos fangos era similar, a veces superior, al de los lignitos que consumían las centrales.

La combustión del carbón, que en términos técnicos se debería catalogar de incineración puesto que se trata de un combustible sólido, parte de la premisa de que el carbón se inyecta pulverizado en el hogar de la caldera. Esta etapa es la que tiene mayores puntos de confluencia con la incineración de fangos de EDAR.

En todas las centrales termoeléctricas modernas el carbón se inyecta micronizado para aumentar la superficie específica, y así potenciar la tasa de transferencia de calor y minimizar el arrastre tanto de material inquemado como de los restos de la roca madre que son los responsables de la producción de las cenizas volantes. El fango de EDAR, por su composición y génesis, es un material con un tamaño de partícula muy fino y también contiene una gran cantidad de material inorgánico. El fango de EDAR tiene una proporción de material térmicamente inerte superior al lignito.

Si bien ambos combustibles comparten una gran cantidad de facetas, existen otras que debieran valorarse desde una óptica ambiental más crítica. El lignito, como otros tipos de carbón, contiene una notable cantidad de material inorgánico que se transforma en una masa semivítrea (la ceniza volante) gracias a la elevada presencia de sílice, alúmina y todo un sinfín de óxidos metálicos que hacen las funciones de fundentes. Todo ello da lugar a las cenizas volantes de geometría esférica que se retienen en los filtros de mangas.

La Figura 12.26 muestra la generación de contaminantes durante la incineración de fangos de EDAR en comparación con otros residuos (RSU) o bien combustibles de los denominados convencionales. Estos valores están extraídos de la bibliografía.

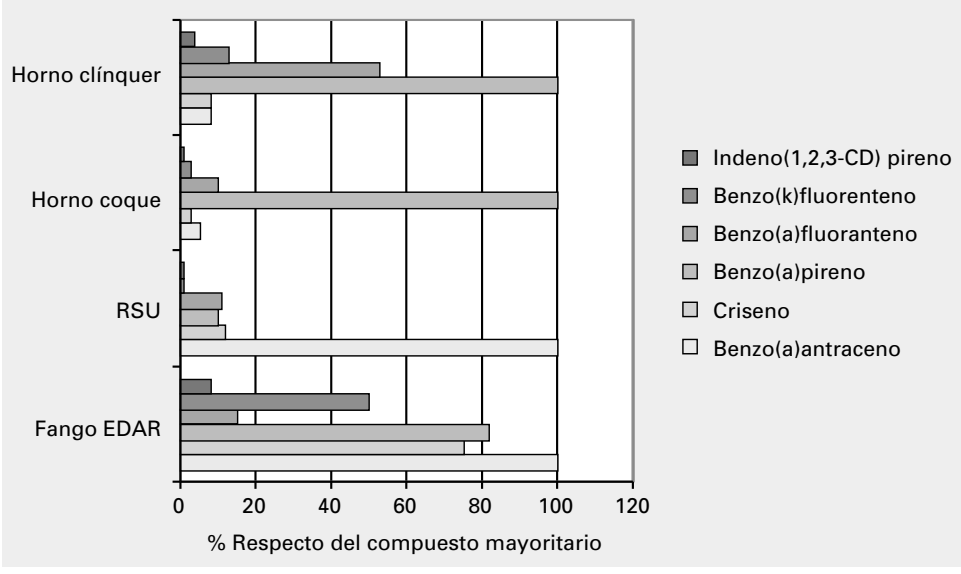


Figura 12.26. Generación de contaminantes en la incineración.

De la Figura 12.26 pueden extraerse dos conclusiones:

- La incineración de cualquier combustible sólido, con independencia de su naturaleza o clasificación, genera compuestos intermedios tóxicos e indeseables. De ahí se desprende la necesidad de la instalación de una cámara de postcombustión.
- La cantidad relativa de los contaminantes hay que atribuirla a la temperatura teórica de trabajo (los hornos de coque y de clínquer funcionan a temperaturas mucho más elevadas que los de incineración de fangos de EDAR o RSU). A mayor temperatura el contaminante dominante es el benzo(a)pireno, mientras que a menor temperatura es el benzo(a)antraceno.

El caso de los fangos de EDAR es ligeramente diferente. En su composición no hay cantidades significativas de sílice ni alúmina que puedan generar por sí mismas un cuerpo vítreo y, por tanto, buena parte de este material se emitirá. Desde el punto de vista ambiental y sanitario la diferencia es fundamental: la ceniza volante es dañina por culpa de su reducido tamaño pero no por su toxicidad química. No obstante, la emisión de óxidos metálicos aúna la toxicidad intrínseca del metal (u óxido metálico) con su tamaño pequeño.

En las centrales térmicas el proceso se lleva a cabo de la siguiente manera. El fango deshidratado, con una sequedad del 20-30%, se mezcla con el carbón pulverizado. Los ensayos han revelado que puede llegar a adicionarse hasta un 5% en peso de fango con relación a la masa de combustible. Los inyectores disponen de un mecanismo de seguridad para retener los impropios de gran tamaño presentes en los fangos. Otra tecnología, la usada en la termoeléctrica de Munchen-Nord (Baviera, Alemania), añade los fangos a una sequedad del 90-95% y se micronizan junto al carbón.

En resumen, en la incineradora convencional la fracción inorgánica residual resultado de haber valorizado la parte orgánica se recupera en el filtro de mangas y, previo tratamiento, se envía a vertedero aunque es posible vitrificarlo en un horno eléctrico para conseguir el residuo cero. En las variantes de coincineración, ya sea vía clínquer o en la caldera de la central térmica, las condiciones son bien diferentes. Ninguna de estas instalaciones suele tener un sistema para la corrección específica sobre la emisión de metales. Así pues, y como conclusión, será preciso llevar a cabo inversiones adicionales en estas plantas para cumplir con los límites de las emisiones de contaminantes.

7.4. EL SECADO DE LOS FANGOS DE EDAR

Por lo general, el término secado se refiere a la eliminación de humedad en una sustancia. El concepto de secado se aplica tan fácil e inconsistentemente que es necesario restringir su uso para llevar a cabo un análisis riguroso y técnico del término. Por ejemplo, un sólido húmedo, como madera, tela o papel, puede secarse por evaporación de la humedad, ya sea en una corriente de gas o sin la intervención de la misma para arrastrar el vapor; sin embargo, generalmente no se considera como secado la eliminación mecánica de esta humedad mediante el exprimido o centrifugado.

Un lodo o una solución puede «secarse» esparciéndola en forma de pequeñas gotas en una corriente de gas caliente y seco, lo que provoca la evaporación del liquido; empero, la evaporación de la solución mediante ebullición en ausencia de un gas para arrastrar la humedad es una evaporación, aunque se considera una operación de secado. Cualquier contenido pequeño de agua presente en un líquido, como benceno, puede «secarse» mediante una operación que en realidad es una destilación; no obstante, la eliminación de una pequeña cantidad de acetona en agua mediante el mismo proceso no se llama secado. Los gases y líquidos que contienen pequeñas cantidades de agua pueden secarse mediante operaciones de adsorción.

El secado no debería incluirse en las variantes de valorización puesto que es una etapa que gasta energía para evaporar el agua del fango. El secado se define como una operación física donde el agua se evapora en la superficie del cuerpo y el vapor de agua es arrastrado por la corriente de aire.

Los materiales de naturaleza inorgánica son más fáciles de secar puesto que la red capilar es muy primitiva y el agua puede fluir fácilmente a la superficie. Por este motivo la cantidad de agua contenida no suele ser muy grande.

En los materiales de naturaleza orgánica, y en particular higroscópica, como los fangos de EDAR, la red capilar es muy extensa y el agua es difícil de extraer puesto que está retenida por fuerzas de adsorción u osmóticas; por ello estos materiales suelen retener el agua con mayor intensidad que los inorgánicos.

Los fangos de EDAR contienen los tres tipos de agua posibles: agua intracelular, muy difícil de extraer, agua capilar, que precisa temperatura para su extracción, y agua libre, la más fácil de extraer. Las modalidades más abundantes son las dos primeras. Así pues esta particularidad condiciona que el sistema de secado sea, eminentemente, a elevada temperatura, por eso se denomina térmico.

El secado térmico debe considerarse también un sistema de estabilización, y por tanto, como una parte del tratamiento de fangos. En cualquier caso lo destacable es valorar que la operación de secado térmico va a ser fuertemente demandante de energía.

Las operaciones de secado pueden clasificarse según se trate de un proceso continuo o intermitente (o bien por lotes). Estos términos pueden aplicarse específicamente desde el punto de vista de la sustancia que se está secando. Así, la operación denominada secado por lotes, generalmente es un proceso en semilotes, en donde una cierta cantidad de sustancia que se va a secar se expone a una corriente de aire que fluye continuamente, en la cual se evapora y a la que se transfiere la humedad. En las operaciones continuas, tanto la sustancia que se va a secar como el gas pasan continuamente a través del equipo. Generalmente, en todas las operaciones ocurre el contacto continuo entre el gas y la sustancia que se seca.

La instalación que se utiliza para el secado se puede clasificar de acuerdo con el tipo de equipo y por la naturaleza del proceso de secado. La clasificación siguiente es útil para delinear las teorías de secado y los métodos de diseño. Atendiendo a los diferentes parámetros, una clasificación puede ser:

1. *Método de operación*, o sea, por lotes o continuo. El equipo por lotes, o semilotes, se opera intermitente o cíclicamente en condiciones de estado no estacionario: el secador se carga con la sustancia, que permanece en el equipo hasta que se seca; entonces, el secador se descarga y se vuelve a cargar con un nuevo lote. Los secadores continuos generalmente operan en estado estacionario. Una cámara de secado funciona en régimen intermitente; el material se carga sobre la vagoneta y cuando está llena se introduce en el secador; seguidamente se pone en marcha el sistema de ventilación y extracción de aire. Como es obvio, las condiciones de secado son diferentes en cada instante. Sin embargo, este sistema es útil para pequeñas cantidades o con geometrías muy dispares.
2. *Método de obtención del calor* necesario para la evaporación de la humedad. En los secadores directos, el calor se obtiene completamente por contacto directo de la sustancia con el gas caliente en el cual tiene lugar la evaporación. En los secadores indirectos, el calor se obtiene independientemente del gas que se utiliza para acarrear la humedad evaporada. Por ejemplo, el calor puede obtenerse por conducción a través de una pared metálica en contacto con la sustancia o, con menos frecuencia, por exposición de la sustancia a radiación infrarroja o calentamiento dieléctrico. En este último caso, el calor se genera dentro del sólido mediante un campo eléctrico de alta frecuencia.
3. *Naturaleza de la sustancia que se va a secar.* La sustancia puede ser un sólido rígido como madera o arcilla; un material flexible como tela o papel; un sólido granular, como una masa de vidrios; una pasta ligera o un fango ligero, o una solución. Si es un sólido, puede ser frágil o fuerte. La forma física de la sustancia y los diferentes métodos de manejo necesarios tienen la mayor influencia sobre el tipo de secador que se va a utilizar.

La Figura 12.27 muestra un esquema de la aplicación de un típico secador directo, los gases de combustión de un combustible pasan directamente sobre el material a secar y, además se trata de un secador continuo.

El esquema no representa la alimentación del material a secar que, de hecho, entra justo entre la salida del generador de gas caliente y el tambor de secado. Los gases, a la salida del secador se dirigen a un ciclón donde se separa el material seco y los gases son evacuados a la atmósfera.

Por lo general, los secadores continuos de fangos funcionan en equicorriente.

7.4.1. Secado y deshidratación

La deshidratación es la eliminación del agua de un sólido. Ésta puede ser total o parcial. Por lo general se usa el término deshidratación cuando se consigue la pérdida de agua por medio de sistemas mecánicos.

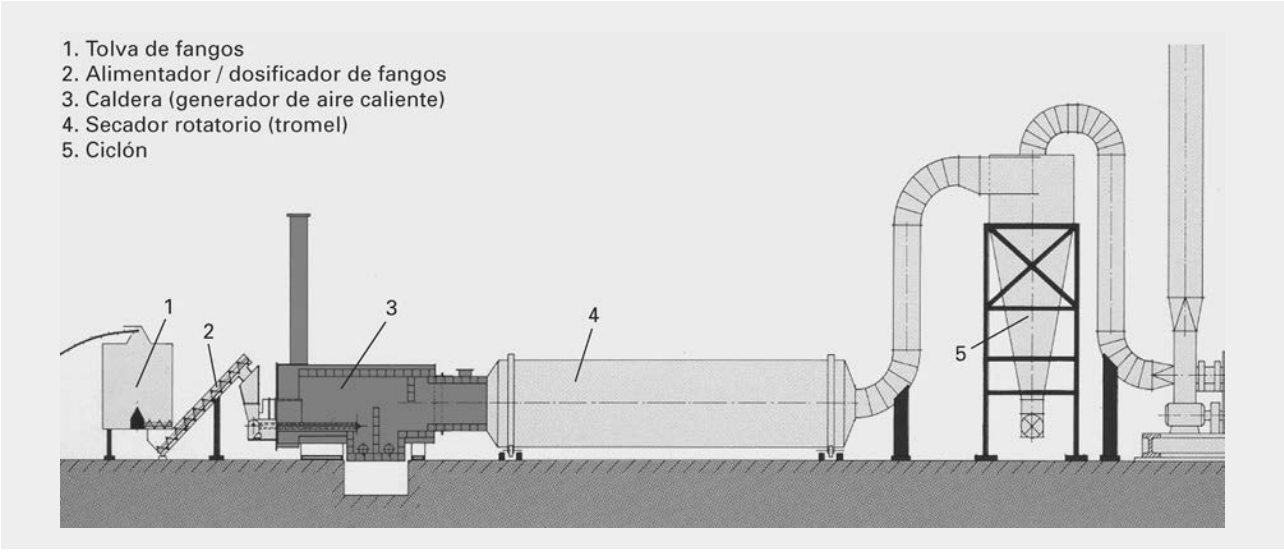


Figura 12.27. Esquema de secador directo y continuo.

En el DVD adjunto, en el punto 5, se muestra información complementaria sobre la separación de partículas antes de la deshidratación.

El secado tendría una definición semejante: también puede ser total o parcial. No obstante, desde el punto de vista técnico se emplea el término secado para referirse a una operación de pérdida de agua por medio del calor.

En el caso de los fangos de EDAR, la terminología usada habitualmente hace referencia a los términos de sequedad o de humedad. Así, un fango con un 30% de materia seca (30% de sequedad) equivale a un fango con un 70% de humedad.

Las etapas previas al secado suele ser la decantación, en el caso de los fangos de EDAR, para facilitar las posteriores labores de deshidratación mecánica propiamente dicha. Así la Figura 12.28 muestra un sistema de separación de agua de dos husillos en paralelo.

El primer husillo recoge el material más grueso (desbaste) mientras que el material filtrado pasa al segundo husillo. Si se añade un floculante primario se pueden llegar a separar partículas de menos de 0,5 mm.

En resumen, los dos grandes sistemas de eliminación de agua en los fangos son:

- Evaporación, ya sea en eras de secado, secado térmico, atomización o secado solar.
- Deshidratación mecánica, en centrífugas, filtros de vacío, filtros banda o filtros prensa.

Por regla general siempre se recurre, en primera etapa, a la deshidratación mecánica puesto que es barata. No obstante, este sistema precisa siempre de la adición de floculantes u otros aditivos lo que va a complicar la siguiente etapa, el secado térmico.

7.4.2. La deshidratación mecánica

Para la deshidratación mecánica, los fangos han de ser previamente acondicionados, ya sea térmica

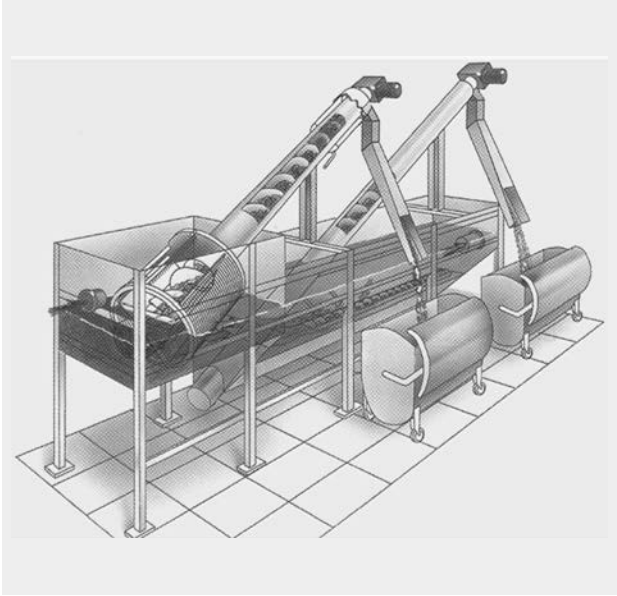


Fig. 12.28. Separador de partículas anterior a la deshidratación.

o químicamente. Los principales datos a controlar en el rendimiento de una deshidratación son:

- Contenido de sólidos (MS, materia seca) en los fangos de salida.
- Contenido de sólidos en el filtrado saliente.
- Consumo de reactivos.
- Peso específico del fango.

Estos factores no son independientes sino que se hallan directamente relacionados entre ellos. Por tanto, el sistema de deshidratación elegido dependerá de las características de la EDAR y de la naturaleza del fango procesado, así como del destino de los mismos. La Tabla 12.21 recoge el sistema mecánico usado según el tipo de fango y el grado de sequedad.

El acondicionamiento químico de fangos tiene por objeto conseguir una aglomeración de las partículas en forma de flóculos. Los reactivos empleados pueden ser de naturaleza orgánica (polielectrolitos, formados por grandes cadenas monomoleculares; a su vez, pueden ser catiónicos o aniónicos) o inorgánica (cal y $FeCl_3$ son los más usados). Por lo general, los reactivos minerales se adaptan mejor a las deshidrataciones en filtros de vacío y prensa, mientras que los orgánicos lo hacen en la deshidratación en centrifugas y filtros banda. Los polieléctrolitos catiónicos son los más adecuados para el acondicionamiento de fangos con elevados contenidos de materia orgánica coloidal, como son los de EDAR. El fango generado en EDAR tiene un porcentaje de sólidos del orden del 4%. Los sistemas mecánicos son los preferidos para pasar desde el 4% entrante hasta el 20-30%, ya que el consumo energético preciso es despreciable frente a la demanda que tendría un proceso térmico.

Los consumos medios específicos de los sistemas de deshidratación son los siguientes:

- Filtro banda 5-20 kW · h / tMS
- Filtro prensa 15-40 kW · h / tMS
- Centrifuga 30-60 kW · h / tMS
- Filtro de vacío 50-150 kW · h / tMS

Centrifugas

La centrífuga, como muestra la Figura 12.29, es una máquina que está compuesta por un tambor cónico/cilíndrico (1) y un tornillo sin fin (2) de extracción. Gracias a la fuerza centrífuga se separan los componentes inmiscibles, basándose en su densidad.

La humedad a la salida es del orden del 75%. El tamaño estándar del fango deshidratado puede oscilar de 10 mm a 10 μm.

En los sistemas combinados de secado térmico con cogeneración, el fango primario se calienta a una temperatura próxima a los 60 ℃ antes de entrar a la centrífuga. Para precalentar el fango primario hasta unos 60 ℃ se usa el agua de refrigeración de las camisas del motor de cogeneración, con lo que se reduce la cantidad de floculantes y se mejora el rendimiento de la centrifugación. En estas condiciones el agua desprende volátiles y produce un fuerte olor. La centrífuga tiene una aplicación creciente gracias a su buena estanqueidad.

En el DVD adjunto, en el punto 6, se muestran diversos modelos de centrífugas.

Tabla 12.21. Sistema de deshidratación según tipo de fango

	Naturaleza fango	$FeCl_2$ (% MS)	CaO (% MS)	Polieléctrolito kg (anhídro)/t MS	Sequedad (%)
Filtro vacío	Mixto fresco	3-6	10-18	—	25
	Mixto digerido	5-7	10-18	—	25
	Estabilizado aerobio	8-15	20-35	—	25
Centrifugas	Mixto fresco	—	—	2-4	25
	Mixto digerido	—	—	2-4	25
	Estabilizado aerobio	—	—	3-5	20
Filtro banda	Mixto fresco	—	—	2-5	25
	Mixto digerido	—	—	2-5	25
	Estabilizado aerobio	—	—	3-6	20
Filtro prensa	Mixto fresco	3-7	11-20	—	45
	Mixto digerido	4-8	11-20	—	45
	Estabilizado aerobio	7-12	15-30	—	30

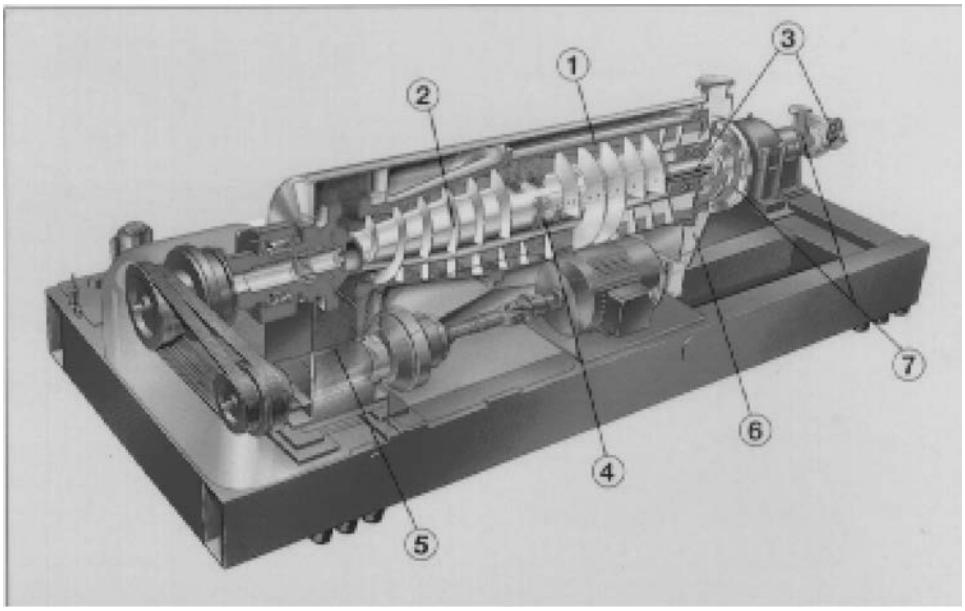


Figura 12.29. Sección de una centrífuga.

El rendimiento de una centrifuga se define como: R = MS extraída/MS alimentada, y, en la actualidad, puede llegar al 95%, sobre todo gracias a la acción de los polielectrolitos. La Tabla 12.22 muestra los valores normales esperados de las centrífugas, así como la cantidad de polielectrolito consumido.

Tabla 12.22. Consumos de electrolitos en las centrífugas

Tipo de fango	Polielectrolito (kg (anhidro)/ t MS)	Capacidad filtración (kg MS/m²h)	Sequedad (%)
Mixto fresco	2-5	300-600	19-25
Mixto digerido	2,5-5,5	250-600	17-26
Aireación prolongada	3-6	200-300	14-22

Bajo el punto de vista de la utilización, la Tabla 12.23 muestra las condiciones óptimas de funcionamiento y los límites de utilización de las centrífugas.

En las aguas con alta carga orgánica y, por tanto, con una cantidad muy elevada de floculantes, las centrífugas no parecen ser los dispositivos más adecuados para llevar a cabo la separación líquido/sólido. La razón estriba en que en estas máquinas las partículas están sometidas a una aceleración centrípeta del orden de 3.000 g (g, aceleración de la gravedad). Ello imprime tal velocidad al flóculo que cuando alcanza la periferia acaba desintegrado, con lo que se pierde, en buena parte, el efecto floculante y parte de la materia retorna a la fase líquida. Para este tipo de aguas sería más recomendable el empleo de filtros de vacío en lámina fina.

Tabla 12.23. Condiciones de funcionamiento y límites de empleo de las centrífugas

Técnica de separación	Condiciones óptimas de utilización	Límite de utilización
Contracorriente	• Separaciones sólido/líquido (fangos municipales e industriales). • Esta tecnología es la que mejor se adapta a los fangos de elevada sequedad. • Adecuada para la deshidratación directa sin espesamiento. • Es el sistema más eficaz para la deshidratación.	Contenidos elevados de materiales abrasivos.
Corriente paralela	• Separaciones sólido/líquido (fangos municipales e industriales). • Tecnología mejor adaptada a fangos difíciles (más o menos orgánicos o minerales) por clarificar el efluente. • Este sistema es especialmente adecuado para fangos muy espesos.	Cargas de MS 25-30%
Fuerza centrífuga	• Eliminación de aceites en líquidos de corte (dos etapas). • Eliminación de materias en suspensión, líquidos de corte solubles.	Fase acuosa de líquidos aceitosos ≅ 80%. Viscosidad del líquido a tratar >60-70 Cst.

Filtro banda

El principio de funcionamiento de un filtro banda consiste, como esquematiza la Figura 12.30, en deshidratar los fangos, habiendo añadido floculantes, mediante etapas de presión y gravedad. La presión es creciente a medida que el fango avanza en la prensa. Es decir, en la primera fase el fango tiene un drenaje libre y en la segunda es sometido a una presión progresiva. La velocidad lineal de avance oscila de 0,5 a 6 m/min. Las telas filtrantes deben lavarse de manera continua.

En ellos, el fango primario es conducido hacia la banda inferior (1). La mayor intensidad de la deshidratación se inicia en el cilindro acanalado (3) y continua durante un sinfín de rodillos (4) de diámetros decrecientes.

A la salida del filtro banda, el fango, o lodo, puede contener una humedad alrededor del 80% (valor insuficiente para depositarlos en vertederos de acuerdo con la legislación vigente). El tamaño estándar de materia en suspensión puede oscilar de 25 mm a 5 mm.

Como ventaja para el empleo de este tipo de filtros cabe decir que son sistemas abiertos de fácil manejo y mantenimiento, y reducido tamaño. En contrapartida hay que señalar que puede haber problemas de emisión de olores.

La Tabla 12.24 muestra los valores normales esperados de los filtros banda, así como la cantidad de polielectrolito consumido.

En el DVD adjunto, en el punto 7, se facilita información complementaria sobre filtros banda.

Filtro prensa

El filtro prensa consta de una serie de bolsas de textil acanaladas, en cuyo interior se inyecta a presión el fango. El valor de la presión puede llegar a 15 kg/cm^2. Una vez se abre el filtro, caen las tortas deshidratadas.

Permiten una mayor deshidratación que los sistemas anteriores, pero es una técnica un tanto engorrosa debido a que se trata de sistemas discontinuos e instalaciones de grandes dimensiones.

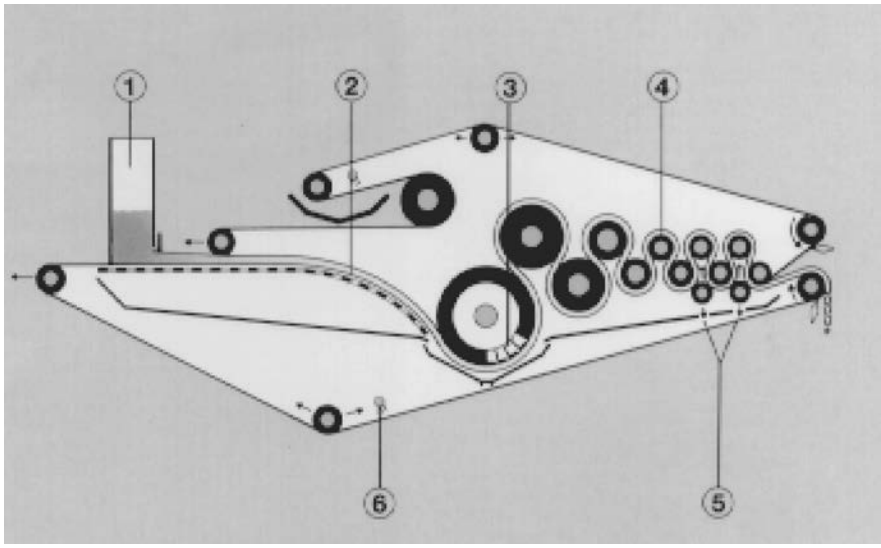


Figura 12.30. Filtro de banda.

Tabla 12.24. Consumos de electrolitos en los filtros banda

Tipo de fango	Concentración (% MS)	Polielectrolito kg (anhidro)/t MS	Capacidad filtración kg MS/m^{2}h	Sequedad %
Primario fresco	5-10	0,9-2	250-400	27-35
Primario digerido	4-9	1-3	250-500	27-35
Mixto fresco	3,5-8	1,5-5	130-300	21-28
Mixto digerido	3-7	2-5	120-350	20-28
Aireación prolongada	1,5-3,5	2-5	80-150	15-25

El empleo de este tipo de filtro está indicado para fangos que contengan pocas materias coloidales, por ejemplo:

- Fangos de aguas residuales urbanas acondicionadas térmicamente.
- Fangos procedentes de los lavaderos de carbón.
- Fangos industriales de naturaleza inorgánica.

La Figura 12.31 muestra una típica instalación de este tipo de filtro. La Tabla 12.25 muestra los valores normales esperados de los filtros prensa, así como las cantidades de aditivos consumidos; en ellos no suele usarse polielectrolito por el peligro de adherencia de los fangos a las telas.

En el DVD adjunto, en el punto 8, puede verse información complementaria sobre filtros prensa.

Filtros de vacío

Se trata de un sistema mecánico de deshidratación de fangos, hoy en día casi en desuso debido a su elevado consumo energético. El principio de funcionamiento consiste en un tambor rotatorio, cuya superficie está formada por telas filtrantes, que gira en el interior de un depósito lleno de agua residual. Una bomba de vacío externa, que genera un vacío entre 300 y 600 mmHg, con un caudal del orden de 60 m^3/m^2, provoca la succión del agua a través de las telas.

Tabla 12.25. Consumos de electrolitos en los filtros prensa

Tipo de fango	Aditivo $FeCl_3$	Aditivo CaO	Capacidad filtración (kg MS/m^2h)	Sequedad (%)
Mixto fresco	3-7	11-19	2-4	40-50
Mixto digerido	4-7	11-22	2-4	35-50
Mixto digerido	Térmico		2,5-5	45-50
Aireación prolongada	6-10	15-30	1,5-3	33-36
Fisicoquímico	—	15-22	1,5-2,5	33-45

Mediante un sistema intermitente se extrae el fango adherido a las telas, se seca parcialmente y después las telas se lavan. La potencia de filtración es del orden de 1,5 kW/m^2 de superficie filtrante.

Los sistemas de deshidratación descritos constituyen las prácticas habituales en las EDAR para obtener sequedades del 20-24%. No obstante existen otras tecnologías, en cierto modo alternativas, que vale la pena comentar para cerrar este capítulo.

Elutriación

La elutriación es un proceso que optimiza la filtración por medio del lavado de los fangos. Reduce la alcalinidad y, por tanto, la demanda de cal y de

Figura 12.31. Imagen de un filtro prensa.

floculantes será menor. Existen dos sistemas básicos de lavar los fangos sólidos:

- En una única etapa de elutriación, que se lleva a cabo en proceso *batch*. El recipiente se llena y se realiza la sedimentación y decantación.
- Dos etapas. El segundo lavado se lleva a cabo con agua limpia.

La primera ventaja de la elutriación consiste en una reducción del amonio y una etapa preliminar de deshidratación. La elutriación también reduce los requerimientos del digestor secundario; sobre todo tratándose de plantas de pequeño tamaño, las ventajas se incrementan cuando se emplean filtros de vacío. También repercute en un ahorro de cloruro férrico, empleado como floculante.

7.4.3. La atomización

Constituye un caso particular del secado, teniendo lugar durante el transporte del sólido. La velocidad de transmisión de calor desde el gas a las partículas es muy alta y el secado muy rápido. Como el tiempo de contacto entre el gas y el sólido es muy corto, la temperatura del sólido raras veces supera los 40 ℃, con lo que la degradación de la materia orgánica es inapreciable (es por esta propiedad que se emplea en la industria alimentaria y en la fabricación de detergentes).

Este método consiste en atomizar (pulverizar) el fango, en forma muy acuosa, en el interior de un reactor por donde circula una corriente de gases calientes a contracorriente o equicorriente.

Debido a la gran superficie de intercambio, el secado transcurre en breves segundos, o incluso fracciones de segundo. Pueden tratarse aquellos lodos cuya reología permita el transporte neumático, el bombeo y la defloculación. Esto supone que el tamaño de grano de la partícula a secar sea muy fino.

Por lo general, la temperatura de trabajo es muy elevada, del orden de los 500 ℃, lo cual limita el proceso de secado de determinados productos, entre ellos los fangos con grandes proporciones de material orgánico.

La temperatura, el estado del producto a la salida, y la humedad final del mismo, dependen del tipo de material. La Figura 12.32 muestra un secador de atomización usado en la industria cerámica para el secado de barbotina.

Desde el punto de vista económico, este sistema, o una variante denominada «*flash drier*», no se usa en el tratamiento de los fangos de EDAR ya que resulta muy caro. Hay que entender que, desde el punto de vista energético, el protocolo normal a seguir comienza por una deshidratación mecánica seguida de un secado térmico. La atomización tendría sentido si se dispusiera de una fuente de calor, en forma gaseosa, abundante y barata.

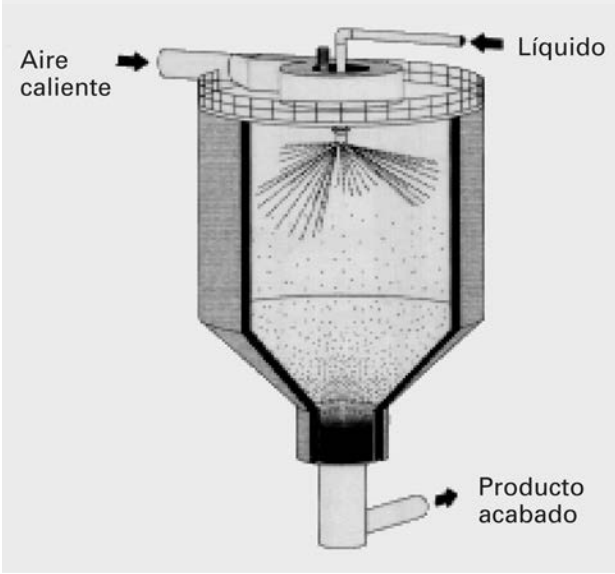


Figura 12.32. Esquema de un atomizador.

En el DVD adjunto, en el punto 9, se muestran otros tipos de atomizadores.

7.4.4. Particularidades del sistema de secado

El secado es una operación que persigue la eliminación del agua presente por evaporación. Ésta, como es sabido, se produce a cualquier temperatura si bien la velocidad de evaporación aumenta con la temperatura. Así, a 100 ℃ la evaporación es total e instantánea tomando el nombre particular de ebullición. En los procesos industriales raramente se llega a este extremo. Sin embargo hay puntos en los que vale la pena reflexionar.

- El agua se halla ubicada en un soporte (materia orgánica, arcilla, etc.). En la medida que deba calentarse el agua, también lo hará el soporte. Esto tiene especial trascendencia en el caso de que el soporte descanse en un elemento de transporte: bandeja, vagoneta, etc.

- El fango, y en general los materiales que han de secarse, no son buenos transmisores del calor. Esto significa que para que el calor penetre desde la periferia y alcance el agua para obligarla a vaporizar, o simplemente a salir, tendrá que vencer una serie de obstáculos. Además, a medida que el secado va prosperando se crean mas poros que dificultan aún más la transmisión del calor.
- Si el espesor de la capa de fango, o de cualquier otro material, es importante, la transmisión de calor por el interior de la masa se dificulta y el proceso se ralentiza.

El resultado de todo ello es que la tasa de evaporación se reduce, y la velocidad de secado disminuye. Para compensarlo sólo hay dos soluciones:

- Aumentar la temperatura de trabajo. Efectivamente, cuando el salto térmico entre la temperatura externa y la interna aumenta, la transmisión del calor también lo hace. No obstante, ello entraña un peligro: la elevada temperatura provoca una emisión excesiva de COV's que pueden provocar accidentes, debido a su inflamabilidad. Por otro lado, es obvio que al aumentar la temperatura el consumo energético específico, kcal/kg H_2O, también se incrementa.
- Alargar la longitud del secador. Con ello lo que se consigue es un mayor tiempo de residencia de los sólidos y permitir reducir la temperatura de trabajo. No obstante, esta solución incrementa en gran medida la inversión del equipo.

A título de síntesis se puede enunciar que los consumos energéticos en la fase de secado están estrechamente relacionados con la calidad de la transferencia de calor.

7.4.4.1. Secado térmico de fangos y cogeneración

El secado térmico es un proceso caro y para mitigar los costes se ha recurrido, al menos en España, a la cogeneración. Se define la cogeneración como la producción simultánea de electricidad y calor.

De hecho, lo que realmente producen las máquinas térmicas, ya sean motores o turbinas de gas, es una energía mecánica sobre un eje que, por medio de un alternador, se convierte en electricidad y con ello se genera un calor sobrante que se trata de aprovechar. Este caudal de gases es el que se usa para el secado térmico.

Los sistemas llamados de cogeneración «en cabeza» son el motor alternativo y la turbina de gas. Se definen de esta manera porque en primera instancia se genera electricidad y, a la vez, calor residual. En este sistema, la variante de motor es el más empleado para el secado de fangos. Por el contrario, en el caso de una incineración, primero se produce el gas caliente (calor generado en la combustión y extraído en forma de gases), después vapor de agua y, finalmente, electricidad. Por esta razón a este sistema se lo denomina de cogeneración «en cola». El ciclo, energéticamente sostenible, aplicado al secado de fangos debería ser: incineración del fango y con el calor generado proceder al secado del fango.

La Figura 12.33 muestra el balance típico de un motor de cogeneración que sigue un ciclo Otto. Teniendo en cuenta que el efluente térmico correspondiente al agua es a baja temperatura y difícilmente se puede emplear mas del 40% de los 1.266 kW (506 kW) y de los gases no se sobrepasa del 60% (560 kW), en total se disponen, de manera efectiva, de 1.066 kW para secar fango, mientras se generan

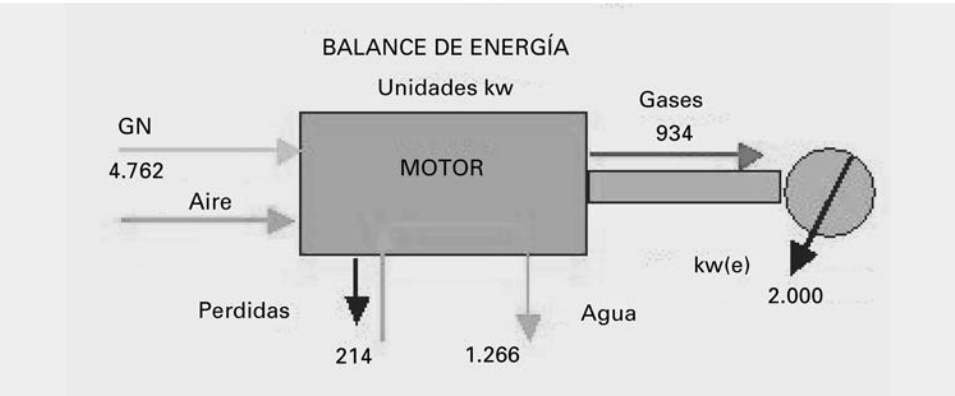


Figura 12.33. Balance térmico de un motor de cogeneración.

2.000 kW eléctricos. Con ello se llega a dos conclusiones:

- Si el precio del gas natural es barato y el de venta de la electricidad es cara, la cogeneración va a ser un negocio en sí.
- Si lo que se persigue es vender electricidad, se llega al absurdo de que es más rentable el sistema de secado más ineficaz.

Como ya se ha comentado anteriormente, el secado es una etapa previa al tratamiento. Por tanto deja un residuo muy importante: el fango seco. En la actualidad se da la circunstancia de que, mientras el precio de venta de la electricidad se estabiliza, el coste del GN sigue una tendencia al alza y, sobre todo, los costes de vertido se incrementan de forma muy importante. Así, mientras el diferencial del coste de adquisición del GN y de venta de la electricidad sea importante, las plantas de cogeneración serán interesantes desde el punto de vista económico. Sin embargo, el incesante aumento de los costes de vertido puede llegar a poner en entredicho la rentabilidad de estas instalaciones cuando los márgenes de la cogeneración se reduzcan.

7.4.5. El consumo energético del secado

En una planta de secado térmico de fangos, el consumo mas importante es el térmico. El consumo energético de un secador de fangos depende, esencialmente, del calor latente de vaporización del agua que, a 20 ℃, es de 620 kcal/kg H_2O. En la práctica, el consumo energético depende de la eficacia de la transferencia de calor, como la masa de aire en circulación o las pérdidas de calor.

El gráfico de la Figura 12.34 muestra el balance energético medio comparado de dos secadores: uno de funcionamiento directo, básicamente por convección (951 kcal/kg H_2O), y otro mixto (esencialmente indirecto) donde se combina la conducción y la convección (780 kcal/kg H_2O).

Los valores están referidos a la unidad de calor (kcal) kg de H_2O evaporada. Así, la partida más importante (la evaporación del agua) se obtiene multiplicando el agua evaporada para pasar del 75% al 10% de humedad en un fango, lo que representa 0,722 kg H_2O por 600 kcal/kg H_2O.

Como es lógico el secadero indirecto, o con mejor propiedad el mixto, donde el calor se transfiere una parte por conducción y otra por convección, presenta el mejor rendimiento.

El consumo eléctrico también depende del principio de funcionamiento elegido. En los secadores de convección, el trasiego de grandes masas de aire obliga a un gasto importante o consumo eléctrico para los motores de las soplantes, que se cifra entre 60 y 400 kW · h/t H_2O evaporada.

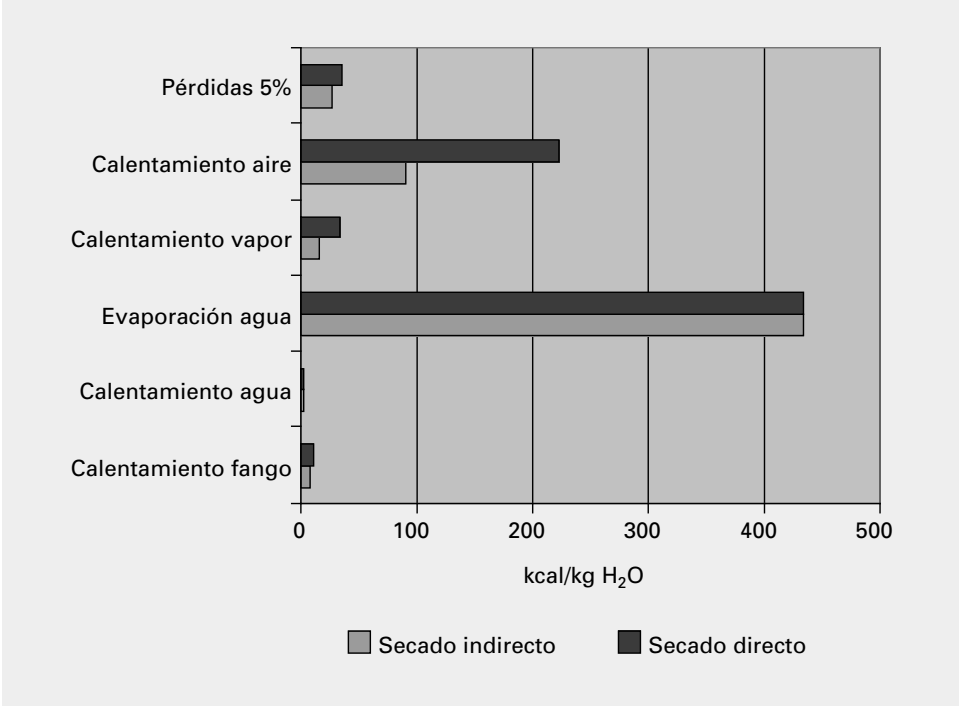


Figura 12.34. El consumo térmico en el secado.

En el caso de los sistemas combinados conducción/convección o de pura conducción, el gasto es menor, pudiendo oscilar entre 40 y 150 kW · h/t H_2O evaporada.

7.4.6. El fango seco

El fango que resulta de una planta de secado térmico tiene, de promedio, una sequedad del 90%. Es importante destacar que si bien ello presenta unas ventajas, como el espacio y la disminución del coste en vertedero, el uso como combustible en las fábricas de clínquer o en centrales termoeléctricas presenta un inconveniente cuando se pretende incinerarlos en un horno de lecho fluidizado, que son los más adecuados para ello. De ello se deduce que antes de proceder a la implantación de un secado sería conveniente preguntarse qué va a hacerse con el fango una vez seco. Hay que tener en cuenta que el combustible usado en el secado y posterior vertido supera el 90% del coste total del secado.

Por otra parte es igualmente interesante reflexionar sobre el pretratamiento más adecuado del fango si su destino va a ser el secado. El fango puede someterse a una digestión antes de entrar en la estación de fangos. Durante la digestión se extrae el biogás y se procede a una incipiente fermentación que tiene como resultado la destrucción física de buena parte de la microfibra, lo cual es beneficioso para los procesos de secado posteriores.

En cambio, la generación de biogás, contra lo que pueda parecer a primera vista, no es tan ventajosa para el proceso de secado. Una vez creado el caldo bacteriano, la producción de biogás continúa y durante la etapa de secado sigue produciéndose biogás, con lo que se introduce un factor de riesgo en el proceso (generación de hidrocarburos y H_2S). En particular esto se pone de manifiesto durante el almacenamiento del fango seco.

7.4.7. La instalación básica de secado

En grandes rasgos el secado térmico consiste en depositar el fango en un reactor y suministrar el calor necesario para reducir la cantidad de agua que lleva. Es necesaria una corriente de aire para arrastrar el agua evaporada. Este aire ha de ser necesariamente tratado, colocándose un ciclón en la salida del tambor de secado y un condensador para licuar el vapor. El agua que ha condensado debe tratarse para depurarla y, por lo general, se devuelve a la cabecera de la EDAR. Al final del proceso frecuentemente el fango se tamiza para obtener un grano uniforme, ni demasiado grande ni demasiado pequeño; los que no cumplen esta granulometría preestablecida son recirculados al secador.

La Figura 12.35 esquematiza las fases principales de un típico secador de fangos con sus etapas principales:

- Secador.
- Ciclón, donde se separa el material seco.
- Condensador, donde se condensa el agua de secado.

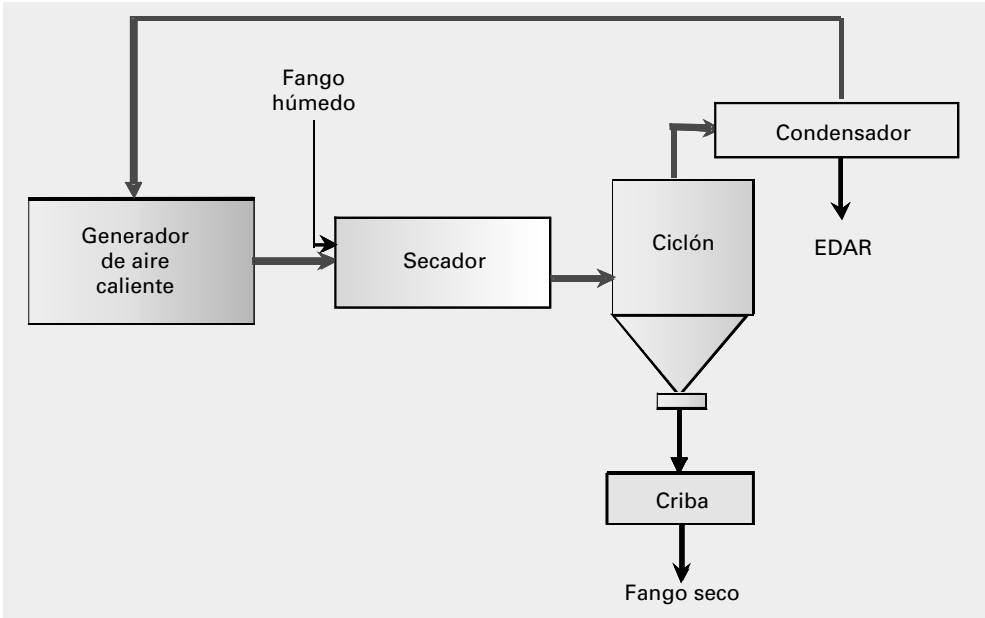


Figura 12.35. Principales etapas de un secado térmico.

7.4.8. Aspectos tecnológicos del secado térmico de fangos

En este apartado se comentan los aspectos técnicos relacionados con el sistema de funcionamiento elegido por los principales fabricantes y sus implicaciones en el funcionamiento y la seguridad.

7.4.8.1. Clasificación por el sistema de funcionamiento

Para simplificar, la clasificación se circunscribirá a:

- *Secadores por convección*, o sea aquéllos en que la transferencia de calor se realiza fundamentalmente por la corriente de aire o fluido. Como sea que la tasa de transferencia de calor por este sistema (convección) es reducida, el rendimiento (kcal/kg H_2O) suele ser limitado. Además, los grandes volúmenes trasegados obligan a una emisión continua de aire al medio.
- *Secadores de contacto.* Donde el calor se transmite mayoritariamente por conducción (y radiación), y una parte por convección. Según como sea la relación conducción/convección la transferencia de masa y energía es mejor. El óptimo se obtiene por el sistema denominado de «capa fina», donde los sistemas de transferencia de calor se optimizan.

7.4.8.2. El circuito cerrado de secado

Un concepto fundamental en la descripción del secado térmico de materiales que puedan contener cantidad importante de sustancias volátiles es la noción de circuito cerrado. En cualquier sistema de protección ambiental y, especialmente los referentes a los tratamientos de residuos, es imprescindible que las emisiones al medio sean mínimas.

En este sentido un sistema de secado sólo debería descargar fango seco y agua, procedente de la condensación del agua eliminada. El esquema de la Figura 12.36, correspondiente a la firma italiana VOMM, simboliza que no hay otras descargas a la atmósfera, y el fluido de secado realiza un circuito cerrado. En virtud del principio de funcionamiento del tipo de secador, el sistema se ve obligado a evacuar una parte del aire de trabajo al exterior. El único efluente que es preciso drenar es el formado por los incondensables (COV's) que se generan durante el funcionamiento, de ahí la problemática añadida si los fangos son digeridos.

Obviamente son deseables los sistemas que trabajan en circuito cerrado, es decir, sin emisión del fluido transportador al exterior.

En el DVD adjunto, en el punto 10, se aporta más información sobre el circuito cerrado en el secado de fangos.

7.4.8.3. La entrada del fango húmedo

En casi todos los secadores se debe evitar la llamada «fase pastosa», donde el fango (en particular el fango de EDAR) se apelmaza y bloquea los sistemas de desplazamiento por el interior del secador.

Este problema suele acontecer cuando el fango alcanza un 50% de sequedad, así pues el problema se presenta al poco tiempo de penetrar en el secador.

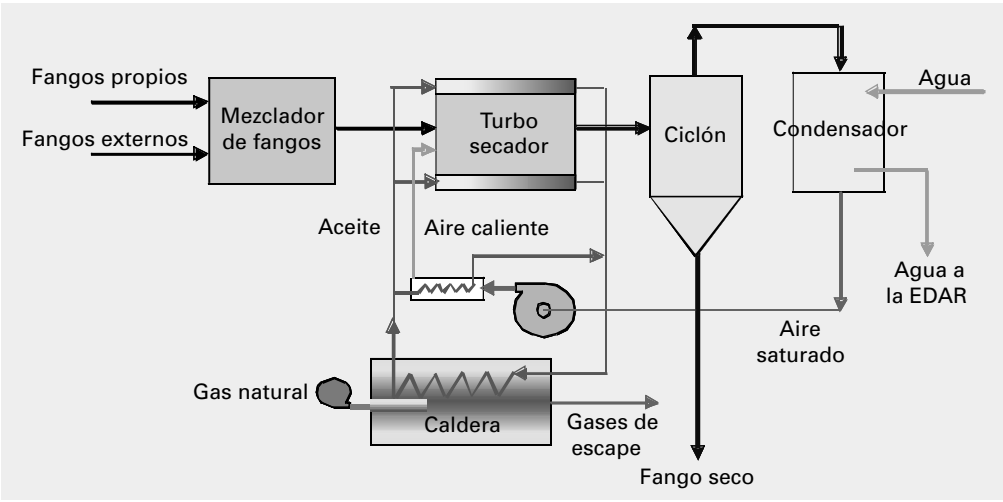


Figura 12.36. Circuito cerrado de secado

Para solventar este problema la mayoría de los sistemas de secado recurren a la recirculación. La adición de fango seco a la corriente de fango húmedo conlleva que la humedad resultante descienda por debajo del punto crítico y así se evitan los trastornos durante el desplazamiento por el interior del secador. Sin embargo ello comporta un trasiego importante de fango seco con problemas adicionales de desgaste y consumo energético.

En este aspecto, nada desdeñable teniendo en cuenta que la mayoría de los secadores precisan recircular casi el 80% del fango, el sistema de «capa fina», entre los modelos convencionales y algunos sistemas de «lecho fluidizado», permiten la entrada y transporte interno de fango con independencia de su humedad, sin necesidad de recirculación interna.

7.4.8.4. La dosificación al secador

Tanto si el fango que alimenta a la planta se genera en la propia EDAR como si la instalación se nutre de fangos de diversas EDAR, existe un problema importante en cuanto a la homogeneización de la humedad.

Este inconveniente conlleva dificultades importantes en el funcionamiento de las plantas ya que estas instalaciones no miden la relación materia seca/humedad a la entrada y en estas condiciones la regulación es imposible. Los instrumentos de control de la instalación no miden la humedad de la materia a la entrada. De hecho, la medida de la humedad de un fango en continuo es, en la actualidad, un sistema complicado y sujeto a errores. Ello puede ser causa de algunos accidentes, puesto que al no detectar un fango más seco, el sistema sigue inyectando calor al fango y ello puede provocar una ignición.

En general sería conveniente que las plantas dispusiesen de un sistema de regulación de la humedad de entrada, o bien, de un mecanismo de detección de la humedad entrante que pudiera mandar una señal al proceso. Hay que tener en cuenta que la parte más importante del consumo es la evaporación del agua y, curiosamente, ésta es una variable que no se regula.

7.4.8.5. La temperatura de trabajo

La temperatura de funcionamiento de un secador debería ser, en teoría, relativamente baja en la primera etapa de secado (evaporación del agua en la superficie del fango) y elevada en la segunda etapa (evaporación del agua en el interior del capilar).

Tal combinación deviene imposible en la mayoría de los sistemas de secado térmico de fangos de EDAR. Así, en los modelos de convección (también llamados directos), el aire caliente se impulsa al interior del secador a una temperatura muy elevada y contacta con el fango cuando el fluido se halla a su máxima temperatura, ya que el sistema es a equicorriente (el aire y el fango entran por el mismo punto).

En los sistemas de conducción pura es la temperatura de la chapa del secador la que manda, mientras que la tenue corriente de aire es la mínima necesaria para arrastrar el vapor generado. Como todo el calor se transfiere por contacto, la temperatura de la pared es elevada y ello puede provocar problemas de sobrecalentamiento en el fango y una excesiva emisión de volátiles si, de repente, el fango entrante es mas seco.

Una vez más el sistema más apropiado, o que se ajusta mejor a los principios de secado, es el sistema de «capa fina» o «lámina delgada» puesto que al poder calentar la pared a la temperatura deseada (incluso variable) el aire en contacto también lo hace. Obviamente también permite el calentamiento de la chapa o el aire del circuito a temperaturas diferentes y ajustadas a las peculiaridades del proceso.

Finalmente, los sistemas de lecho fluidizado permiten reducir la temperatura de trabajo a base de aumentar la superficie de contacto entre la fase gas y el fango gracias a la gran turbulencia creada y al tamaño de partícula de fango.

En líneas generales el sistema de secado será tanto más seguro cuanto menor sea la temperatura de trabajo, y tanto más económico cuanto menor sea el caudal de aire a trasegar.

En valores medios estas temperaturas, según el sistema de secado, son:

- Convección pura: de 300 a 500 ℃.
- Conducción pura: de 100 a 130 ℃
- Mixtos: de 200 a 270 ℃.
- Lecho fluidizado: de 80 a 100 ℃.

Desde el punto de vista de la seguridad (explosiones, incendios) los dos tipos primeros son los más sensibles; el primero por la elevada temperatura del fluido a la entrada, y el segundo por la elevada temperatura precisa en la pared, lo que calienta el fango en demasía.

7.4.8.6. Tiempo de permanencia de sólidos

El tiempo de residencia de los sólidos en el interior del secador es una consecuencia del sistema de secado. Técnicamente es el preciso para eliminar toda el agua.

En casi todos los secadores este tiempo oscila alrededor de los 30 minutos, con la excepción del sistema de «capa fina» que está tan sólo 2 o 3 minutos.

La «capa fina», sistema exclusivo de la firma Italiana VOMM, consiste en centrifugar una cantidad de fango, de un espesor fino, sobre la pared interna del secador. Como que la pared está caliente, el vapor se genera de forma instantánea y el brusco incremento de volumen desmenuza el fango. Con ello aumenta la superficie específica y la corriente de aire acaba de hacer el resto. El resultado es un tiempo de retención muy breve, el suficiente para eliminar la humedad y no calentar el fango demasiado.

En los demás sistemas, incluido el lecho fluidizado, el tiempo es largo. La razón principal es que como que la capa es gruesa ella misma es aislante y el calor tarda más en atravesar la capa. Ello entraña un peligro, con la excepción del sistema de lecho fluidizado: que una parte del fango se caliente en exceso y genere muchos volátiles con el consiguiente riesgo.

7.4.8.7. La recirculación de los fangos

Los fangos de EDAR tienen un punto crítico de «pegado» que depende del grado de humedad. Esto es, según el tipo de fango comienza a adherirse a las paredes cuando la humedad está por encima del 40-50%. Por eso todos los sistemas de transporte interno precisan de añadir una cantidad de fango seco para mezclarlo con el húmedo antes de ser introducido en el secador.

Es obvio que ello es una complicación, ya que precisa de una máquina intermedia, la mezcladora, de un tamiz y de todo un sistema de transporte y recirculación. Al margen de lo que pueda significar la inversión y la explotación en términos económicos de consumo, la recirculación de fangos entraña un peligro desde el punto de vista de la explotación.

En efecto, si por problemas de mezcla deficiente, lo cual no es del todo descartable puesto que determinados sistemas llegan a recircular casi el 80% de los fangos, una parte del fango seco entra en contacto con la pared caliente del secador, existe el peligro de una rápida volatilización y/o incendio.

7.4.8.8. El contenido de oxígeno

Se entiende por ello la cantidad, en volumen, de oxígeno presente en el aire de secado. El aire exterior tiene un contenido en oxígeno del 21% en volumen. Cuando abandona el secador una parte importante es vapor de agua y, en términos relativos, el porcentaje de oxígeno disminuye.

A la salida del secador el gas está lleno de polvo (fango seco), vapor de agua y COV's (compuestos volátiles orgánicos). El problema de la presencia de O_2 en los gases es que es el comburente preciso para hacer detonar o combustionar un gas y/o polvo contenido en el gas.

Cuando se usan gases procedentes de un motor de cogeneración, el porcentaje de oxígeno suele estar alrededor del 14%, puesto que hay una importante proporción de CO_2.

Para reducir el porcentaje de oxígeno sólo existen dos soluciones: añadir nitrógeno a los gases del circuito cerrado o CO_2, éste último mucho mas asequible y barato. Para ello pueden desviarse los gases de la caldera, que suelen tener una cantidad de O_2 próxima al estequiométrico.

El tramo comprendido entre el secador y el ciclón es el más peligroso debido a:

- Máxima concentración de polvo y COV's.
- Alta temperatura, para evitar la condensación del vapor de agua.
- Alta velocidad, para evitar la sedimentación. Ello comporta el riesgo de abrasión y calentamiento secundario.

Si a ello se le añade la creación de electricidad estática en la parte metálica de los diversos componentes de la instalación, la presencia de O_2 actúa como detonante.

Más que la cantidad de polvo, de cara a la seguridad es crítica la distribución granulométrica del mismo y ello depende, al margen de la tipología del fango, de la forma de circulación por el interior del secador. Una mezcla explosiva de polvo es la que corresponde a una concentración de polvo fino mayor de 320 g/m^3 en presencia de una cantidad de oxígeno superior al 15% y una temperatura mayor de 350 ℃. En estas circunstancias, cualquier atisbo de chispa hará explosionar la mezcla.

El límite de O_2 que garantiza una seguridad de funcionamiento es difícil, por no decir imposible, de establecer. Depende de la cantidad y calidad de los COV's, de la cantidad, calidad y estado del polvo,

de la temperatura, etc. Sin embargo, se recomienda que no sea superior al 8%.

Los sistemas de convección (grandes flujos de aire caliente) suponen elevadas velocidades de transporte, muchos choques en el interior del secador (alta atrición) y, obviamente, gran cantidad de oxígeno. Por ello estos sistemas son los más propensos a sufrir incendios y/o explosiones.

En los sistemas de conducción pura (bandejas) y en los de contacto por discos el problema suele ser la gran temperatura de la chapa, la mala transmisión del calor en la capa de fango y los puntos calientes que, a la postre, conducen a los mismos problemas.

La Figura 12.37 reproduce un esquema del sistema de secado térmico de fangos de EDAR de la firma Andritz. El calor generado en una caldera es cedido al aire por medio de un intercambiador que entra en el secador, de tipo directo. A la salida un filtro de mangas separa el polvo. El tamiz separa la fracción fina que es recirculada.

En el DVD adjunto, en el punto 11, se aporta documentación complementaria sobre diversos sistemas de secado térmico de fangos.

7.4.9. Secado solar de fangos

En 1997 un grupo de investigadores de la Universidad de Hohenheim en Alemania, líder mundial en la investigación sobre secado solar de baja temperatura, fundó la empresa Thermo-System Industrie & Trocknungstechnik GmbH. La empresa desarrolló un sistema de secado solar de fangos de EDAR, que hasta 2006 se aplicó en más de 70 instalaciones con capacidades de hasta 300.000 habitantes equivalentes.

El sistema consiste en naves de tipo invernadero, un robot y un sistema de control inteligente que controla y regula los parámetros importantes del secado.

La energía consumida oscila de 17 a 28 kW · h por tonelada de H_2O evaporada frente a los 70-120 que consumen los secados térmicos convencionales. El proceso es interesante para su aplicación a depuradoras urbanas de poblaciones entre 1.000 y 300.000 habitantes y que dispongan de espacio suficiente para la instalación.

El sistema es apto para trabajar con fangos tratados aerobiamente con el 3% de materia seca, en cuyo caso el recinto se llena a razón de 0,425 m^3/m^2 (con el aspecto que muestra la foto del invernadero de la Figura 12.38), o bien fangos digeridos anaerobiamente y/o deshidratados con un contenido de materia

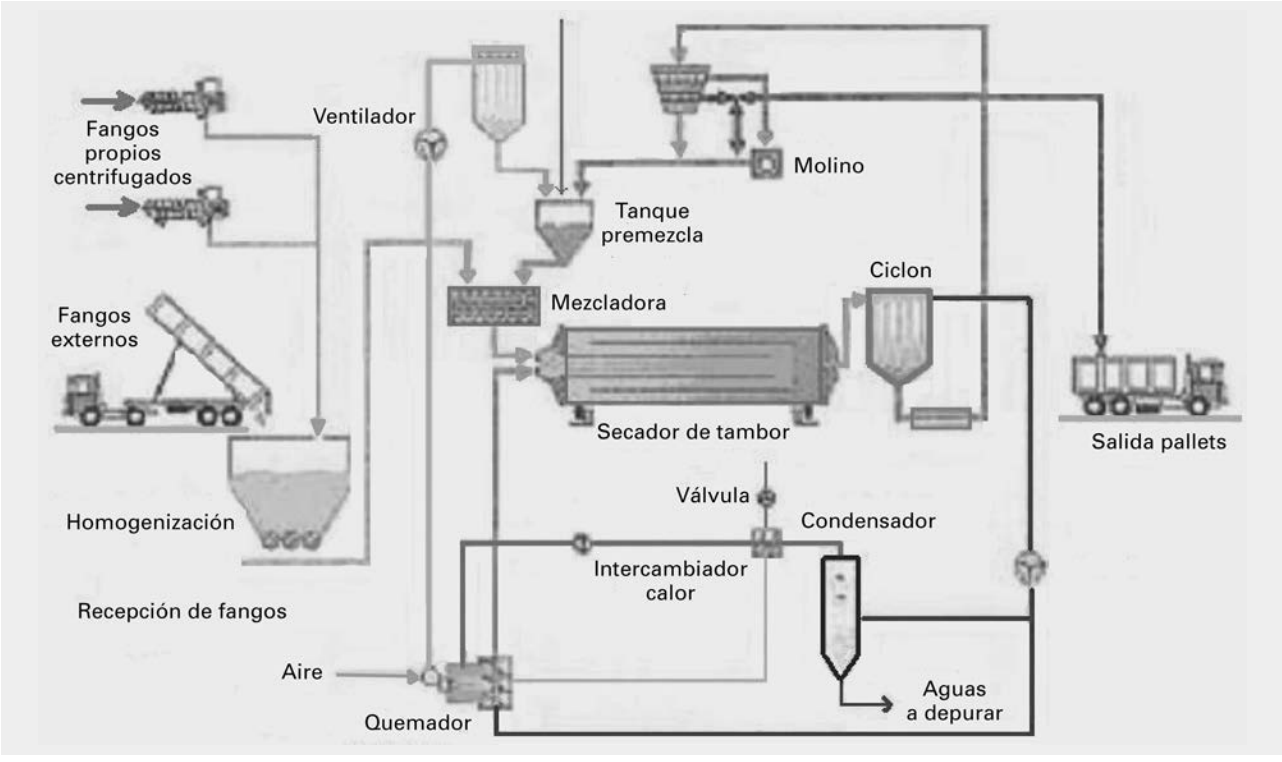


Figura 12.37. Sistema de secado térmico de fangos de Andritz.

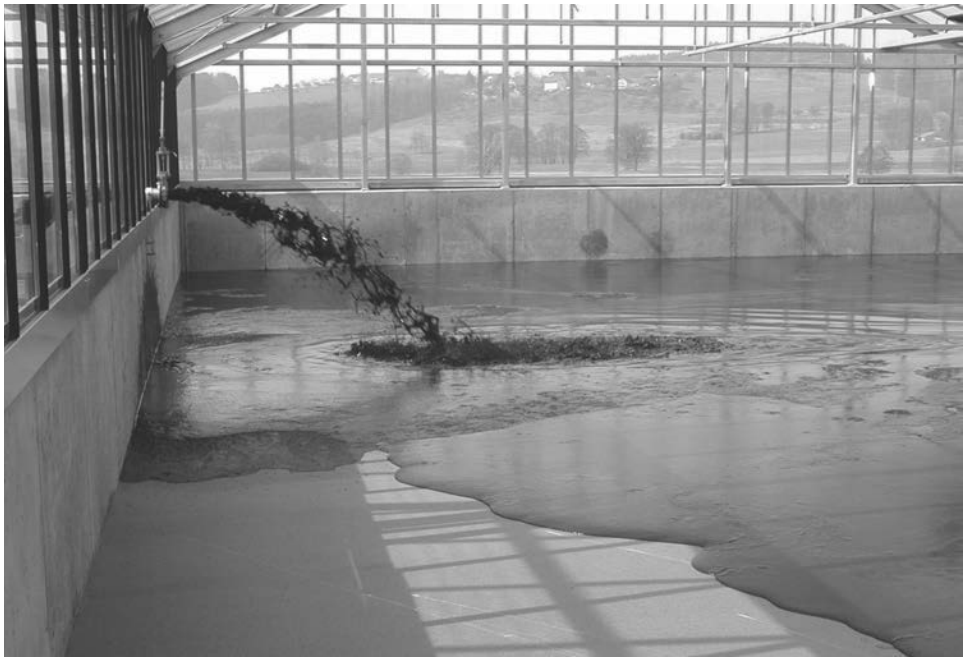


Figura 12.38. Nave-invernadero con suelo de drenaje para secado solar de fangos líquidos. Entrada de fango.

seca del 10-40%, en cuyo caso la tasa de ocupación es de 0,25 m^3/m^2. El fango seco obtenido tiene un aspecto de material granulado.

El principio del proceso del secado solar es el mismo en ambos sistemas. La radiación solar de frecuencia corta traspasa la cobertura traslucida de la nave, se convierte en radiación de frecuencia larga (calor) que queda retenida por el material de la cobertura y así calienta el interior del invernadero.

En caso de las instalaciones para fangos y/o lodos líquidos, se instala un suelo de drenaje para eliminar el exceso de agua antes del inicio del secado. Los fangos se introducen a la nave mediante una bomba adecuada y se distribuyen por si mismos. Los secaderos para fangos deshidratados se cargan a través de camiones, cintas, etc.

Sobre el lecho de fangos circula un «robot», como muestra la Figura 12.40, equipado con unas finas ruedas metálicas y diferentes herramientas específicas para cada tipo de fango que actúan a modo de aradas, que va removiendo constantemente el fango. Durante el proceso el fango es trasladado y

Figura.12.39. Nave-invernadero cargado con fangos deshidratados. Inicio del secado.

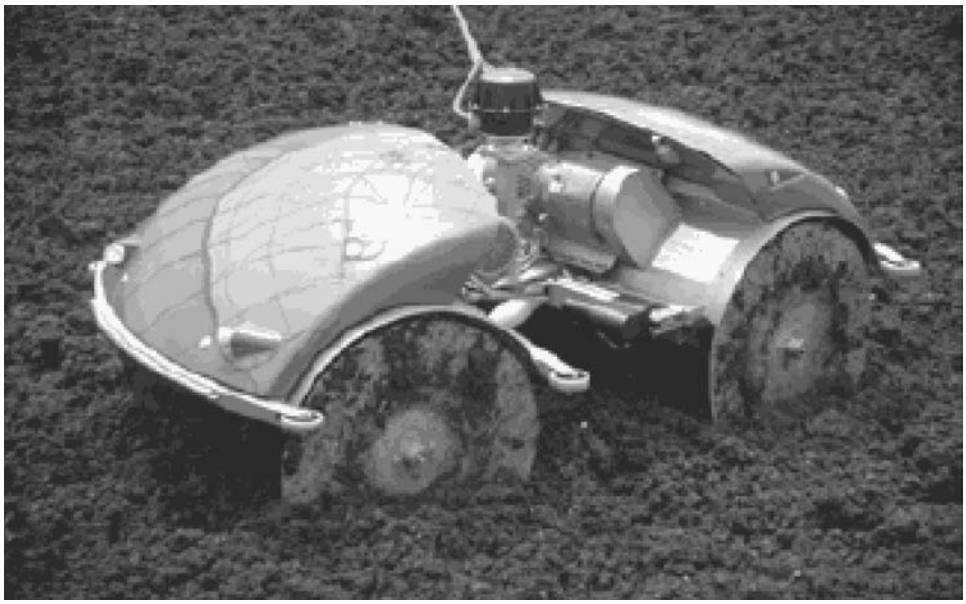


Figura 12.40. Robot para remover fangos.

mezclado hasta doce veces al día. Para ello el robot va resiguiendo toda la superficie de la nave comandado por un motor eléctrico que recibe las instrucciones desde un programa informático. El programa se autocorrige en función de los diversos parámetros de temperatura y humedad que va tomando constantemente.

El esquema reproducido en la Figura 12.41 indica que la recirculación de aire en el interior del invernadero está diseñada para lograr la máxima saturación del aire. La masa de aire no es reemplazada por otra caliente y seca hasta que la anterior no se halla saturada. El funcionamiento del robot, de las trampillas y ventiladores se controla de forma automática en función de los parámetros climáticos reales.

Las principales ventajas del sistema de secado solar en discontinuo, son la posibilidad de poder ajustar de manera optimizada las condiciones de secado a cada fase del proceso y la tecnología del volteo por el «robot». Como resultado se consigue un secado rápido y homogéneo a bajos costes energéticos y de mantenimiento.

La eficacia energética depende, claro está, de las condiciones meteorológicas del lugar, pero los experimentos realizados en Centroeuropa han funcionado con intensidades de radiación entre 1 y 5 kW · h/día,

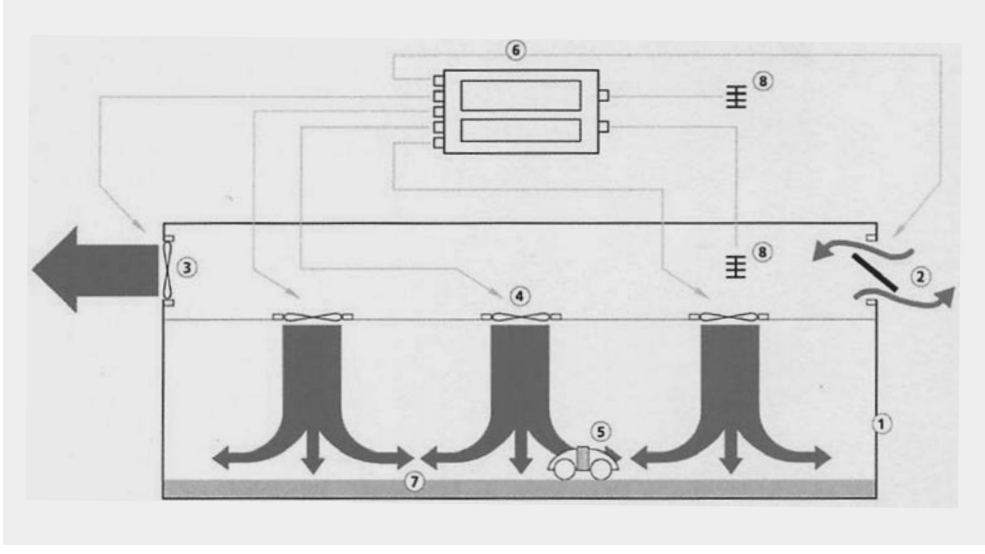


Figura 12.41. Principio de funcionamiento de la aireación en un secador Termo-System.

logrando temperaturas en el interior del invernadero entre 0 ℃ de mínima y casi 50 ℃ de máxima. El ciclo medio de secado es de 21 días (variable en función de las condiciones climáticas y de la altura de los fangos) para alcanzar una concentración de sólidos del 85%, lo que corresponde a una evaporación diaria de 6,3 kg de agua por metro cuadrado y día.

Desde el punto de vista higiénico, la concentración de gérmenes fecales coliformes se reduce de $2{,}4 \cdot 10^6$ MPN a $4{,}3 \cdot 10^3$ MPN en 17 días.

El consumo eléctrico medio es del orden de 20 kW · h/t H_2O evaporada. El 40% de esta cantidad corresponde al motor eléctrico del robot y el resto a los ventiladores que aspiran aire ambiente que en parte lo hacen recircular por el interior a una velocidad óptima para arrastrar el vapor producido. Opcionalmente el aire de salida se puede conducir a un biofiltro antes de ser emitido a la atmósfera. Obviamente, las plantas son completamente herméticas y no producen olores.

Las necesidades de espacio dependen de las condiciones climáticas del lugar y, naturalmente, de los requerimientos de sequedad del fango. No obstante valores entre 1,0 y 2,4 toneladas de agua evaporada por metro cuadrado de invernadero y año, se consideran normales en la UE.

El encarecimiento de los combustibles fósiles y la presión ambiental para la búsqueda de sistemas de secado más sostenibles, han impulsado el desarrollo de numerosos tipos de secadores solares completamente automáticos, como el que muestra la Figura 12.42.

Las múltiples aplicaciones y el éxito del concepto del secado solar ha dado lugar al desarrollo de nuevas tecnologías como el denominado «gestor de lodos», cuyo concepto es el siguiente:

- El gestor de lodos (patentado) carga, distribuye, gira y airea los fangos de forma completamente automático.
- Desde la carga hasta la descarga todo se realiza por una máquina. No hace falta ningún otro equipo de transporte adicional.
- Solución completa para instalaciones de secado automatizadas.

El principio de funcionamiento se halla esquematizado en la Figura 12.42.

Las ventajas más sobresalientes se pueden resumir en:

- Flexibilidad máxima: funcionamiento en continuo o discontinuo.
- Transporte de fangos en dirección longitudinal y transversal.
- Posibilidad de funcionamiento con fangos con menos de 20% MS.
- Proceso aerobio sin formación de olores gracias a la aireación óptima.
- Mantenimiento sencillo; el equipo compuesto por el tornillo sin fin puede ser desmontado fácilmente del puente.

7.4.10. Lechos secantes

Los lechos secantes son, de hecho, una mejora del sistema de lagunaje (balsa donde se depositan los fangos líquidos en espera de una evaporación natural) y representan los precusores de los sistemas de

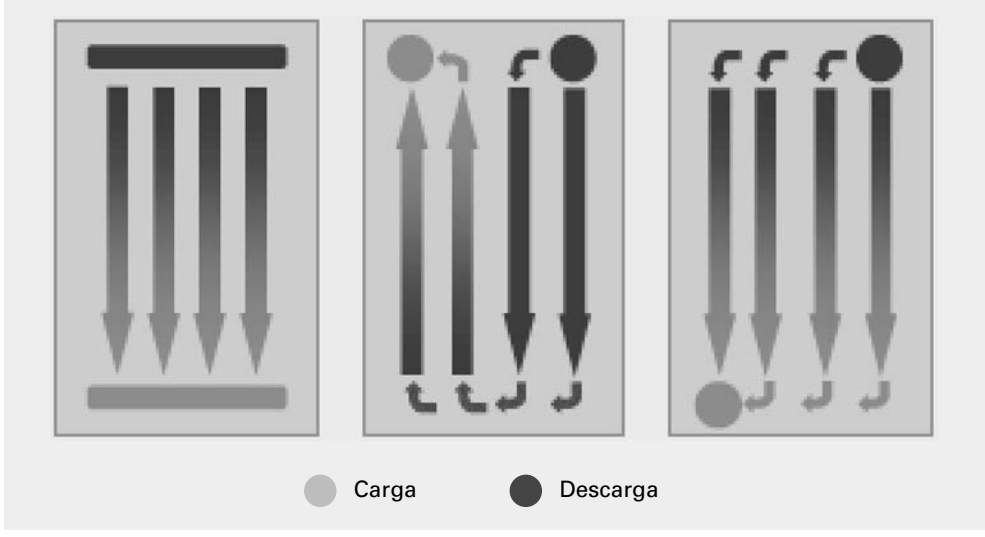


Figura 12.42. Principio de funcionamiento del sistema automático de volteo.

Figura 12.43. Modelo de volteo automático en funcionamiento.

secado solar. Los filtros de fangos consisten en un lecho de 30 o 50 centímetros de arena gruesa; con frecuencia la parte inferior es grava. Los 6 cm más superficiales contienen una arena con un tamaño de 6 a 3 mm. Durante épocas de lluvia o de invierno es conveniente recubrir el lecho con una protección de vidrio o plástico. Siempre se debe tener la precaución de analizar el agua antes de la descarga.

Por lo general el filtraje es malo y, como etapa previa, hay que recurrir a la digestión, la elutriación o a un pretratamiento fisicoquímico. Si el drenaje es malo, la tasa de evaporación se reduce.

La evaporación es dependiente de las condiciones del aire circundante y de la profundidad del lecho, no realizándose a más de 20 cm de profundidad.

En el DVD adjunto, en el punto 12, se aporta más información sobre sistemas de secado solar de fangos.

7.5. LA GASIFICACIÓN

Siguiendo la lógica de la valorización de los fangos de EDAR, el secado térmico parece la primera etapa, aunque está por ver cuál debe ser la humedad que se necesita para la segunda fase, que bien pudiera ser la gasificación.

La gasificación es un proceso en el que se convierte, mediante oxidación parcial a temperatura elevada, una materia prima (generalmente sólida) en un gas con un moderado poder calorífico. Normalmente se trabaja con un 25-30% del oxígeno necesario para la oxidación completa. Esta característica distingue a la gasificación de otros procesos termoquímicos como la combustión (oxidación completa, generalmente con exceso de oxígeno) y la pirólisis (descomposición térmica en ausencia de oxígeno).

En la gasificación, la energía química contenida en el sólido se convierte en energía química contenida en un gas. Este gas se puede utilizar de forma mucho más flexible (como materia prima de procesos químicos o como combustible en calderas, motores, turbinas o pilas de combustible). El producto es un gas de poder calorífico intermedio (gas de síntesis o «syngas») formado por gases combustibles (H_2, CO, CH_4, C_2H_6, etc.) y, naturalmente, también gases típicos de combustión.

Comparada con los sistemas de combustión, la gasificación es una tecnología de mayor eficiencia y menor impacto ambiental cuando se trata de producir electricidad a bajo coste a partir de materiales sólidos, y puede llegar a aproximarse a la producción de electricidad en ciclo combinado a partir de gas natural. La mayor eficiencia en la generación de electricidad repercute en la disminución de costes de operación y menor producción de CO_2. Adicionalmente, el proceso de gasificación puede ser adaptado incorporando tecnologías avanzadas para la captura de CO_2, con un reducido impacto en los costes y mejora de la eficiencia térmica. Esta característica será uno de los factores más importantes para la selección de la tecnología en las futuras plantas de energía.

En la secuencia de operación de fangos, la primera fase ha de ser el secado. Obviamente el secado es un proceso endotérmico, lo interesante es conocer que el calor del secado puede proceder de la misma energía generada durante la gasificación de los fangos de EDAR. La fase de pirólisis/gasificación indicada en el esquema de la Figura 12.44 significa que en el reactor de gasificación se llevan a cabo un sin fin de reacciones en las que, si bien las de oxidación parcial (con defecto de aire) son las mayoritarias, no cabe excluir las de pirólisis e incluso muchas de combustión. La forma en la que tienen lugar los diferentes procesos y reacciones depende del tipo y diseño del gasificador.

La Figura 12.44 muestra las principales reacciones que tienen lugar en el interior del reactor de gasificación. El punto clave del proceso es el control de las complejas reacciones para lograr la máxima conversión de los compuestos carbonosos y que ellas pasen al gas de síntesis.

Desde el punto de vista de las diversas modalidades de gasificación, la clasificación está directamente relacionada con la naturaleza de la materia a gasificar. Así se puede distinguir:

- *Gasificación en condiciones severas.* Destinada básicamente al tratamiento de productos petrolíferos y derivados del carbón. Para ello se trabaja a alta temperatura (> 1.000 ℃) y presión (> 10 bar). Se emplea preferentemente oxígeno, en lugar de aire, y la adición de vapor de agua es fundamental para lograr la reacción $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$.
- *Gasificación en condiciones suaves.* Se aplica para lograr la despolimerización de las macromoléculas típicas de la biomasa (entre ella, naturalmente, el fango de EDAR), carbohidratos, polifenoles, etc. Se emplea aire como agente gasificante y la temperatura es inferior a 1.000 ℃. En cuanto a la presión, hay gasificadores que trabajan a presión atmosférica.

Los gasificadores de lecho fluidizado son de construcción más sencilla que los de lecho fijo; el sólido se alimenta con un tamaño más fino que en el caso del lecho fijo (circunstancia que favorece el empleo de fangos). Al inyectar el agente gasificante por la parte inferior, se mantienen en suspensión las partículas de sólido formando un lecho fluido que se comporta de manera análoga a un líquido en ebullición. La reacción tiene lugar con el sólido suspendido en la corriente gaseosa, lo que facilita el contacto entre ambas fases. La extracción de las cenizas suele hacerse por la parte inferior. La temperatura acostumbra a estar limitada a 900 ℃ para evitar la posible fusión de las cenizas con el elemento que constituye el soporte (que por lo general es cuarzo) y provocar el colapso del sistema.

El volumen de gas producido en los gasificadores de lecho fluidizado por unidad de volumen de reactor es superior al de los gasificadores de lecho fijo, lo que se traduce en un menor precio. La composición del gas es muy uniforme, variando muy poco con las condiciones de operación debido a las buenas condiciones de transferencia de calor y materia que proporciona el lecho fluidizado. La Tabla 12.26 in-

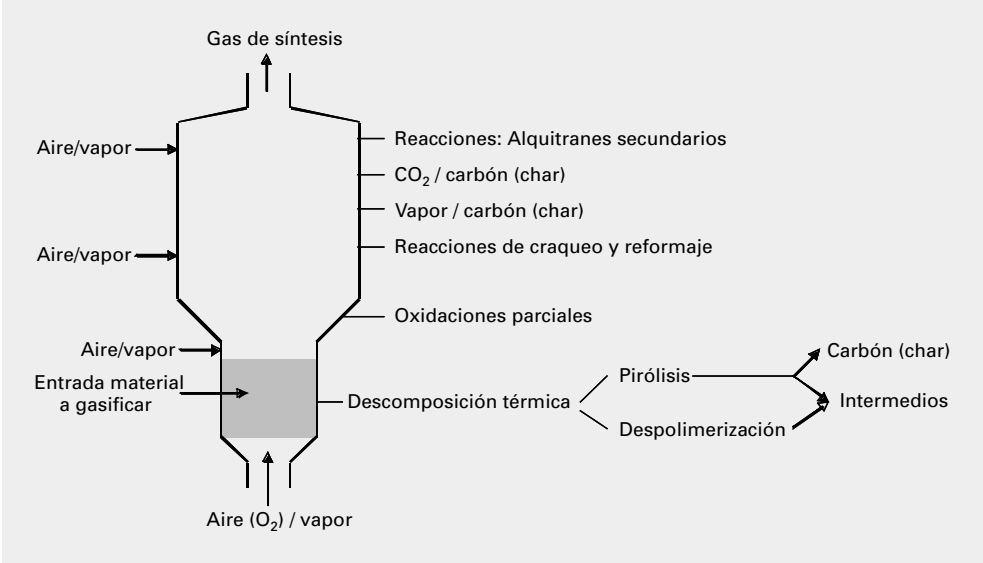


Figura 12.44. Principales reacciones de gasificación.

Tabla 12.26. Composición típica del gas de síntesis en % molar

	Aire	Aire + vapor
N_2	55,8	35,5
Ar	0,8	0,5
H_2	9,5	35,2
CO	10,3	17,9
CO_2	14,1	10,9
CH_4	4,2	0,5
C_2H_4	2,2	—
C_xH_y (C_2-C_5)	2,1	—
C_xH_y (mayor de C_6)	1,0	—

dica la composición típica del gas de síntesis procedente de un RSU (con un PCI algo inferior a un fango de EDAR). La columna central muestra la composición del gas de síntesis seco cuando se emplea aire como agente gasificante, mientras que el gas de síntesis que aparece en la columna de la derecha se ha logrado empleando como fluido gasificante una mezcla de aire y vapor.

A diferencia de la combustión, donde la presencia de agua es siempre un problema, la gasificación precisa de un cierto contenido de agua (el rango idóneo oscila del 10 al 35%) para desarrollar las reacciones de formación de hidrocarburos.

La gran ventaja del sistema es la correcta transformación del combustible en gases y la ausencia casi total de inquemados sólidos. Como inconveniente debe resaltarse la formación de compuestos intermedios, hidrocarburos policíclicos (alquitranes) que suelen originar problemas durante el enfriamiento del gas. En la tecnología de gasificación desarrollada por Enerkem, el gas de síntesis se enfría hasta 400 ℃, temperatura a la cual no condensa alquitrán alguno y de esta manera se puede aprovechar el calor sensible que contiene. Seguidamente el gas se introduce en un *scrubber* y, a continuación en un separador de alquitranes donde éstos son de nuevo reinyectados en el reactor de gasificación.

La Figura 12.45 muestra el esquema de un reactor de lecho fluidizado Rashcka, por gentileza de TTRES.

Como indica la figura, los fangos penetran por la zona media inferior a través de un desmenuzador que garantiza una buena repartición del material en toda la sección del reactor. Por la parte inferior se inyecta el agente fluidizante (aire en defecto sobre el estequiométrico) que debe estar a temperatura ambiente para no aumentar la temperatura interna del reactor. El diseño de la parrilla constituye la parte esencial de la tecnología para una correcta gasificación de la materia.

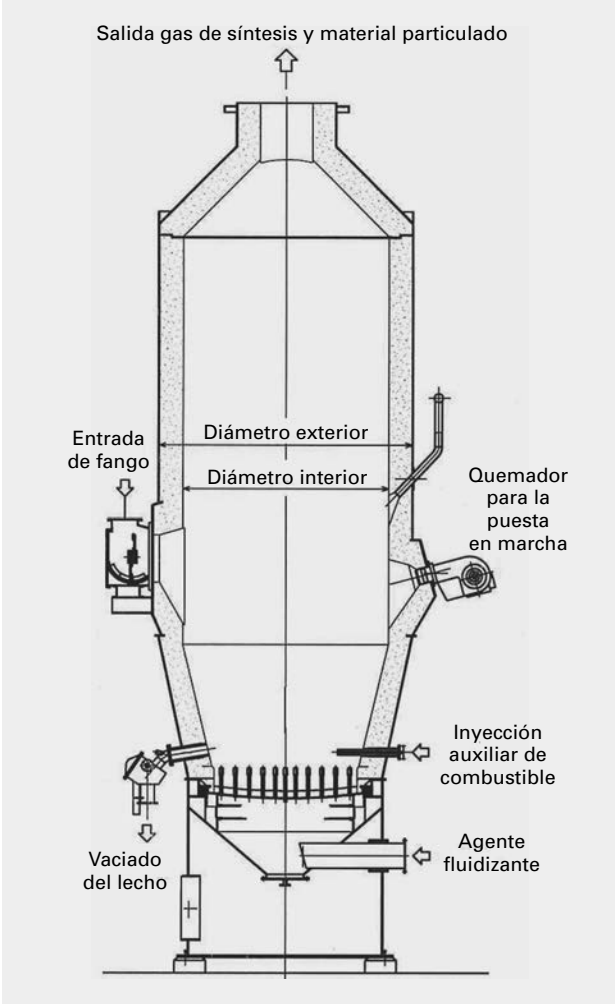


Figura 12.45. Reactor de lecho fluidizado para fangos de EDAR.

7.5.1. Valorización del gas de síntesis

Existen, como se verá, diversas maneras de valorizar energéticamente los fangos de EDAR. La Figura 12.46, muestra que a la salida del gasificador el gas de síntesis se puede valorizar de diferentes formas:

- *Directamente en una caldera*. Para ello debe pasar previamente por una cámara de oxidación y postcombustión; ésta es la tendencia más extendida. Valorizar el calor sensible del gas en una caldera. A partir de este punto las opciones son diversas: generar electricidad en un

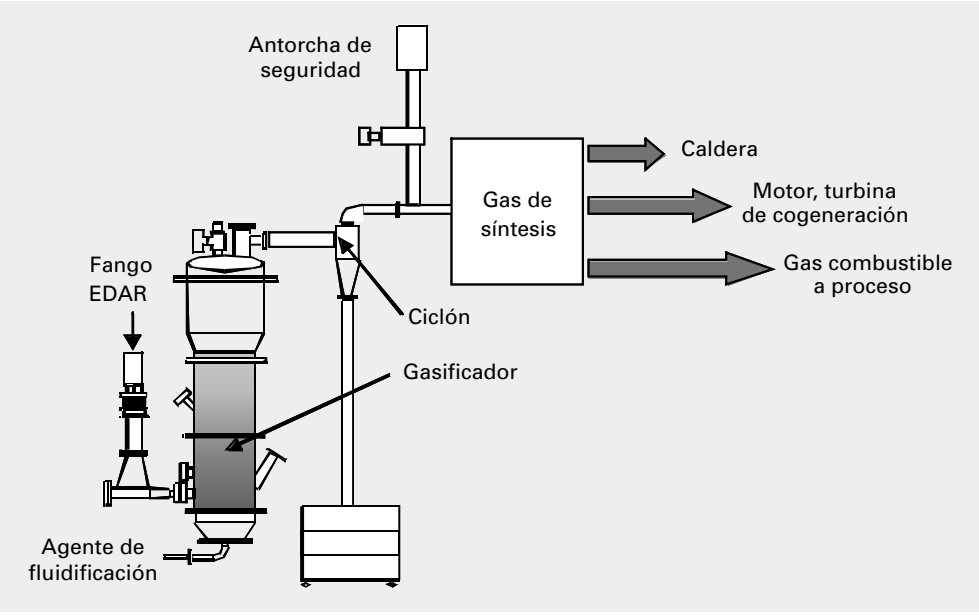


Figura 12.46. Posibilidades de valorización del gas de síntesis.

ciclo de Rankine, producir vapor o, simplemente, aceite térmico para el secado parcial de los propios fangos. De esta manera se cierra el ciclo energético y no se debe emplear energía externa para el secado de los fangos.

- *En un motor de cogeneración o en una turbina de gas.* En el primer caso los gases deben enfriarse hasta 45 ℃. Ello puede comportar muchos problemas técnicos y el rendimiento final conseguido no difiere mucho del ciclo de Rankine con caldera y turbina de vapor. En el caso de la turbina de gas el problema es bien diferente. El gas de síntesis se combustiona (oxida) en la turbina a la temperatura de salida del reactor, sin necesidad de enfriarlo. Este sistema parece ser el futuro para las valorizaciones efectivas del gas de síntesis. En estos momentos se está trabajando para poner a punto turbinas de gas capaces de funcionar con diversos tipos de gas de síntesis. El problema de la turbina puede ser la presencia de metales (muy frecuentes en los fangos de EDAR) que, debido a las elevadas temperaturas, pueden condensar o fundirse sobre los álabes de la turbina desequilibrándola. La firma con mayor experiencia es Orenda.
- *Gas combustible a proceso.* Es una buena opción cuando existen en las inmediaciones de la planta gasificadora hornos de proceso capaces de usar este gas a la temperatura que abandona el reactor.

El esquema general e integral del proceso de valorización en ciclo de Rankine está representado en la Figura 12.47, donde se observa que el gas de síntesis a una temperatura de unos 900 ℃ se oxida en la cámara de oxidación, añadiéndole el aire secundario que exige la legislación vigente. Más tarde entra en la cámara de postcombustión donde los gases van a permanecer dos segundos de 850 a 1.100 ℃ (según la catalogación del fango).

Ahora el gas desprovisto de toda materia orgánica penetra en la caldera de recuperación para ser valorizado energéticamente. A la salida de la caldera, a una temperatura de 185 ℃, el gas se conduce a una etapa de tratamiento de gases por vía semiseca convencional consistente en:

- Neutralización de los gases ácidos en un reactor donde se inyecta lechada de cal.
- Inyección de carbón activo en polvo para adsorber las trazas de metales y organoclorados que hayan podido recomponerse en la fase de enfriamiento en la caldera.
- Filtro de mangas. Donde se retiene todo el material particulado, carbón activo y sales formadas en la neutralización.

7.5.2. La gasificación y el ciclo combinado

Los grandes generadores de electricidad en previsión de las consecuencias que les reportará la puesta en marcha del Protocolo de Kioto, han venido desarrollando plantas de tecnologías avanzadas que

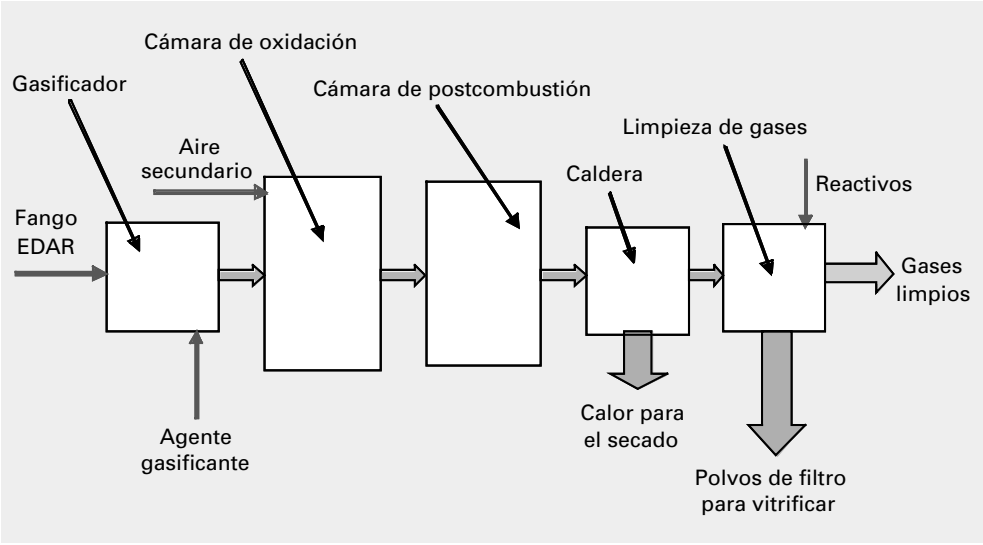


Figura 12.47. Esquema general del proceso de valorización energética de fangos.

generen menos CO_2 por kilowatio eléctrico producido. Una de estas experiencias es la de Elcogas, que recibió el apoyo económico de la UE por medio de un programa «Thermie» para la puesta en marcha de una Central de Ciclo Combinado con Gasificación Integrada (GICC) de 335 MW en Puertollano (España).

En esencia, el proyecto consta de un reactor presurizado que a alta temperatura gasifica carbón nacional de muy mala calidad. Precisamente lo interesante de este comentario es la similitud entre el carbón (45% de cenizas) y el fango de EDAR, y los resultados ambientales. El resto del material usado en la gasificación es igualmente interesante ya que se añade coque de petróleo de la refinería de Repsol-YPF con un contenido del 6% en azufre. Como es sabido, en las condiciones reductoras del proceso el azufre se transforma en ácido sulfhídrico (H_2S) y sulfuro de carbonilo (COS), que son eliminados por los sistemas convencionales.

En relación a los resultados ambientales, claves para la viabilidad de la tecnología GICC, se ha demostrado la enorme potencialidad de este método ya que las emisiones gaseosas finales son comparables a las obtenidas cuando se usa gas natural.

Desde el punto de vista operativo el proceso más complejo ha sido la adecuación de la turbina de gas al empleo del gas de síntesis. Para ello se han tenido que cambiar los quemadores de la turbina para evitar los problemas de calentamiento y vibraciones que, finalmente, han sido resueltos.

El buen rendimiento energético que se consigue con la aplicación de la tecnología de gasificación en ciclo combinado, hace que las emisiones de CO_2 de una central de GICC se puedan evaluar en un 20% inferiores a las correspondientes a una central termoeléctrica convencional de carbón y ello es muy interesante en los tiempos que se avecinan.

7.5.3. Valorización integral de fangos de EDAR por gasificación

El sistema expuesto es novedoso y está basado en la tecnología de lavado del gas de síntesis de la firma canadiense Enerkem. Para hacer más universal el ejemplo mostrado en la Figura 12.48, se parte de un fango externo casi seco (90% de sequedad) y de otro húmedo (23% de sequedad). Ambos se deben mezclar en proporciones adecuadas para que la sequedad de entrada al gasificador sea del orden del 70-75%.

El gasificador es de lecho fluidizado y no es preceptivo usar aire enriquecido. Tanto los impropios separados en el gasificador como los procedentes del ciclón pasan por un intercambiador para recuperar el calor sensible para el secado de los fangos húmedos y después se envían a vitrificar.

El gas de síntesis a la salida del ciclón se enfría hasta unos 400 ℃. A partir de aquí atraviesa dos *scrubbers* en serie. El primero de carácter básico y el segundo ácido. En ambos se separan los inorgánicos que también se envían a vitrificar. Finalmente, una vez libre de mercurio, el gas de síntesis es apto para ser introducido en la turbina de gas.

Un gas de síntesis tratado de esta manera tanto puede aplicarse a una turbina como a un motor.

La decisión final deberá tomarse en función de las necesidades energéticas globales de la planta:

- La turbina tiene un rendimiento eléctrico del 30% y un solo tipo de efluente, gaseoso, a 450 ℃.
- El motor presenta un rendimiento eléctrico en torno al 37%, un efluente gaseoso (que representa sobre el 30% de la energía entrante) a 450 ℃ y el resto agua, en circuito cerrado a 90 ℃ que debe refrigerarse.

Si el dimensionado de la instalación es la adecuada, la electricidad producida por la turbina es suficiente para la vitrificación, con lo cual el sistema deviene completamente autónomo en energía, tanto térmica como eléctrica. Los únicos «residuos» son sales valorizables, agua limpia y el material vitrificado que se venderá en forma de baldosa o teja.

7.5.4. Emisiones atmosféricas en la gasificación

A la salida de los gasificadotes, el gas de síntesis contiene una serie de contaminantes que deben depurarse antes de su emisión. Ante todo conviene puntualizar el sistema de limpieza según:

- Si se emplea el ciclo de Rankine, el gas de síntesis se oxida y va la salida del gasificador para aprovechar el calor en una caldera; a la salida de ésta se deberán depurar los gases, tal y como se ha explicado en el apartado 7.5.1.
- Si se va a generar electricidad (como se ha explicado en el apartado 7.5.3), ya sea en un motor de cogeneración o en una turbina, el gas de síntesis se depura y luego se valoriza. En este caso una vez oxidado, a la salida del motor o la turbina, no es preciso depurarlo.

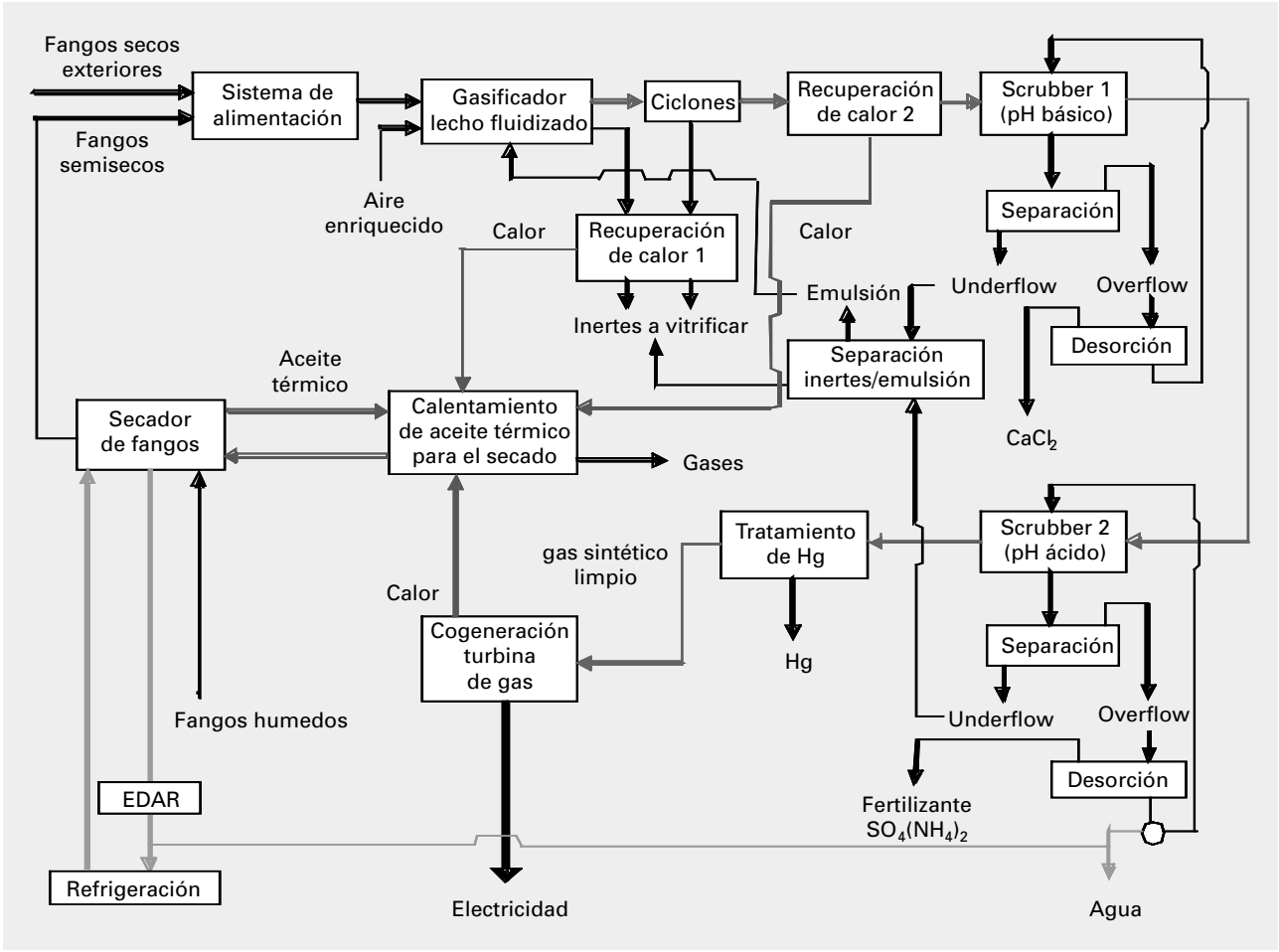


Figura 12.48. Sistema integral de valorización de fangos por gasificación.

En resumen, si la valorización del gas de síntesis va a ser térmica, el gas se depura a final del proceso, pero si se va a producir electricidad la depuración debe ser antes de la valorización.

En este último caso vale la pena comentar en detalle algunos aspectos relativos a la limpieza del gas de síntesis:

- *Metales.* Cuando se gasifican fangos de EDAR los metales son abundantes. Es preciso un intenso lavado alcalino para precipitar los metales. El único metal que escapa al proceso es el mercurio, que deberá adsorberse en carbón activo antes de su introducción en el motor o en la caldera.
- *Cloro.* Debido al medio reductor en que trabaja la gasificación, se forma HCl. Sin embargo, los reactores de lecho fluidizado permiten la inyección de $CaCO_3$, que con la temperatura se descompone y el CaO resultante forma $CaCl_2$ que se recupera en el ciclón. El resto de cloro puede abatirse en el *scrubber*. Este procedimiento asegura la eliminación total del cloro.
- *Azufre.* De análoga manera que en caso del Cl, la inyección de caliza en el reactor produce $CaSO_3$, $CaSO_4$ y CaS que son captados en el ciclón y, si algo escapa en el *scrubber*.
- *Nitrógeno.* Este elemento es el que suele originar más episodios de contaminación en todos los procesos de conversión energética. En la gasificación, aproximadamente el 25% del N presente en el combustible pasa a NH_3 y el resto a N_2. En cambio en la incineración, o en la oxidación directa del gas de síntesis, todo el N pasa a NO_x. El NH_3 es absorbido y procesado en un *stripper* por lo que se transforma en N_2 y H_2.

7.6. VALORIZACIÓN MEDIANTE INCINERACIÓN

La incineración de los fangos es una práctica habitual en numerosos países de la UE. Conviene, para empezar, hacer una referencia al tema de la incinerabilidad de los fangos de EDAR.

7.6.1. La incinerabilidad de los fangos

Es conveniente remarcar esta propiedad del fango como combustible, puesto que el fango puede llegar a contener una cantidad de agua muy importante y, en algunos casos, puede resultar no incinerable o, como algunos autores definen, operación de balance negativo, es decir, que hay que suministrar energía externa cuando se pretende incinerar un fango tan húmedo.

La Figura 12.49 muestra la frontera en la cual un fango deja de ser incinerable, sin el concurso de un combustible de apoyo, o bien autoincinerable. El ejemplo parte de un fango con un PCI de 3.500 kcal/kg (4,069 kW/kg), al que se le va añadiendo una cantidad creciente de agua (eje abscisas), con lo que el PCI útil del fango resultante se halla representado en el eje de ordenadas.

Es realmente difícil determinar un valor del PCI útil a partir del cual el fango dejará de ser incinerable; figura también muestra una banda, calor medio, que se podría cifrar en unas 1.000 kcal/kg. El principal problema estriba en que si debido a la cantidad de agua que hay que evaporar, la temperatura se mantiene baja, la radiación térmica emitida no será sufriente para destilar los volátiles y gasificar y pirolizar la fracción orgánica, cuyo resultado es la extinción de la combustión.

En resumen, para el fango del ejemplo propuesto, la banda de «incinerabilidad» oscila entre un 35% de

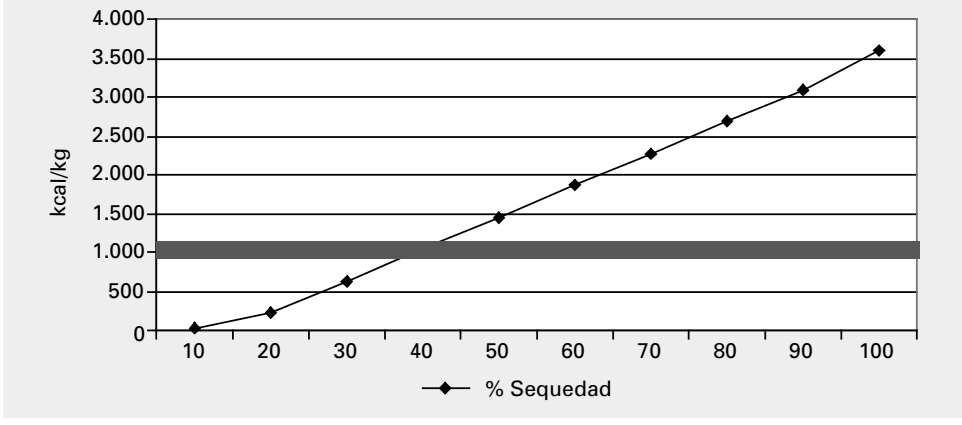


Figura 12.49. Umbral de incinerabilidad de un fango de EDAR.

sequedad (65% de humedad) y un 45% sequedad (55% de humedad). Por encima del umbral del 65% de humedad el fango será escasamente autoincinerable y por encima del 45% de sequedad, será tan incinerable que podrá ocasionar problemas de fusión de escorias (y del árido del lecho fluidizado) debido al exceso de temperatura generada.

7.6.2. Diversas opciones de incineración de fangos

En este apartado se hará un pequeño repaso a cómo se lleva a cabo la incineración de fangos de EDAR de acuerdo con los tres tipos de hornos más frecuentemente usados para este fin en Europa:

- Horno de lecho fluidizado.
- Horno de bandejas.
- Horno rotativo.

7.6.2.1. Incineración de fangos en hornos de lecho fluidizado

El principio de funcionamiento estriba en la gran transferencia de calor que se lleva a cabo desde las partículas de refractario que constituyen el lecho que se mantiene en constante agitación, gracias al caudal de fluidificación. Ello es particularmente importante en el caso de los fangos.

La alimentación se realiza por la parte central del lecho. En función del diseño y del tipo de horno (burbujeante o circulante) el arrastre de material será más o menos intenso. En cualquier caso las partículas serán recogidas en un ciclón.

La planta de incineración de fangos de Saidef, cerca de Friboug (Alemania), entró en funcionamiento a finales de 2005 con una capacidad de 4 t/h de fangos al 25% de sequedad. La instalación, como muestra la Figura 12.50 dispone de un secador, cuya energía proviene de la propia incineración, de manera que los fangos penetran en el lecho fluidizado con un 45% de materia seca. La temperatura del lecho es de 800 ℃. Este esquema se repite, con pocas variantes en Bilbao (España).

Desde el punto de vista técnico las ventajas que aporta el lecho fluidizado en comparación con otros sistemas pueden sintetizarse en:

- Requiere un menor exceso de aire, con lo que el rendimiento de la combustión será mayor.
- Puede trabajar a temperaturas menores, con lo que se evita la fusión parcial de las escorias del combustible en el seno del lecho.
- Las instalaciones son más compactas.
- Posibilidad de introducir catalizadores en el lecho.

Pero desde la óptica medioambiental las ventajas son, si cabe, más importantes:

- Posibilidad de usar mezclas heterogéneas de combustibles, siendo el estado físico de alguno de ellos difícil (fangos).
- Minimización de las emisiones de Cl y SO_2 por adición de reactivos en el propio lecho (carbonatos).
- Reducción de los niveles de NO_x al trabajar a menores niveles térmicos y excesos de aire más reducidos.
- Aumento del tiempo de residencia.

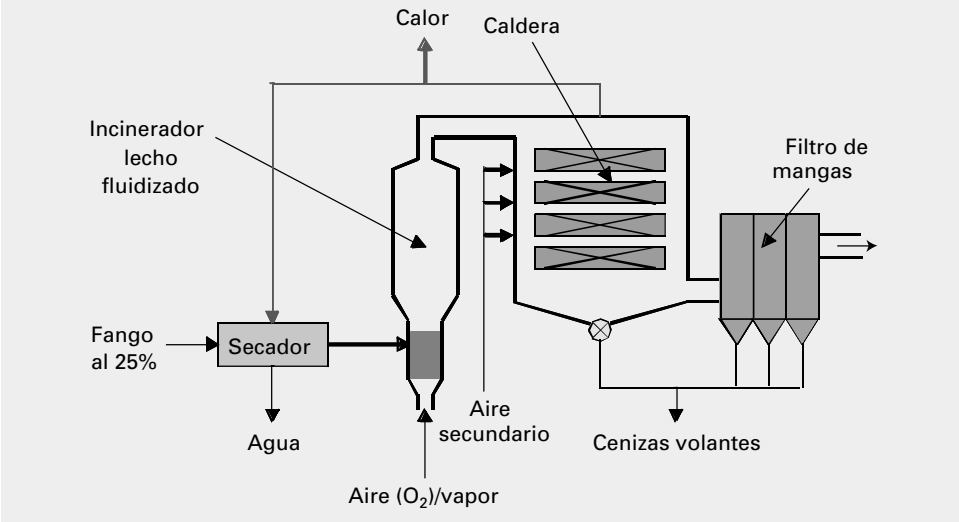


Figura 12.50. Esquema de una planta de incineración con lecho fluidizado.

7.6.2.2. Incineración de fangos en hornos de bandejas

El horno de bandejas, o multiestante, responde a una concepción antigua que ha sido usada para la tostación de piritas. El fango es alimentado por la parte superior de las bandejas que se hallan unidas a un eje central.

El fango a medida que cae se va secando y comienza a destilar. La ignición y combustión ocurren en la parte baja del horno. El sistema de control es complicado ya que el fango no siempre entra con las mismas características, por este motivo su funcionamiento suele ligarse a otra instalación, como en el caso de la planta de KVA/SVA en Limmattal, cuyo esquema reproduce la Figura 12.51.

Como muestra la figura, los gases de combustión procedentes de los fangos se envían al incinerador de RSU, de mayor capacidad, y la cámara de postcombustión, caldera, etc., es común a ambos incineradores.

7.6.2.3. Incineración de fangos en hornos rotatorios

Esta modalidad de horno suele usarse para la incineración de residuos industriales, cárnicos o bien cuando se trata de incinerar mezclas de residuos con PCI no bien definido. Como se trata de un horno multipropósito, los fangos pueden adicionarse de cualquier manera.

Esencialmente consta de un cilindro con revestimiento de material cerámico en su interior, que va girando a una velocidad variable y montado también con una inclinación que permite regular el tiempo de residencia de los sólidos.

Las principales características diferenciales son:

- La carga suele ocupar el 20% del volumen.
- Permite variar la inclinación y la velocidad, y con ello el tiempo de permanencia de los sólidos (por lo general las escorias son de muy buena calidad).
- No hay partes metálicas, lo que equivale a decir que no existe limitación de temperatura de trabajo.
- Puede trabajar con cualquier cantidad de aire. Por lo general en el horno se adiciona el aire estequiométrico y el exceso se lleva a cabo en la cámara de oxidación.
- Reducido arrastre de partículas. Ello depende de la relación longitud/diámetro.

La planta de incineración de fangos de EDAR de KVA en Oftringen, que consiste en un horno rotato-

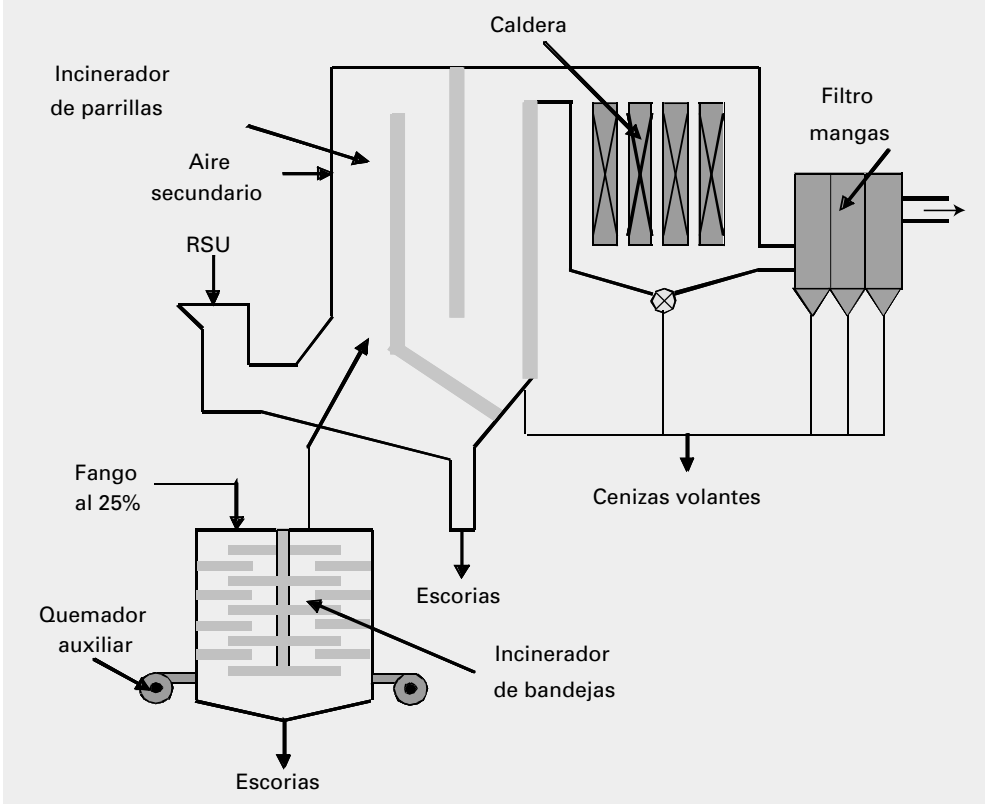


Figura 12.51. Esquema de una planta de incineración con horno de bandejas.

rio, funciona en combinación con un horno de parrillas de RSU (de manera análoga al esquema anterior). Sin embargo existen instalaciones en que funcionan incinerando sólo fangos de EDAR.

7.7. OTROS TRATAMIENTOS

Existe todo un universo de tecnologías nuevas para el tratamiento de los fangos, ya sean procedentes de aguas residuales como industriales.

7.7.1. La oxidación en condiciones supercríticas

Es posible oxidar la materia orgánica en contacto con agua en condiciones supercríticas. Con ello se logra oxidar toda la materia orgánica, en particular aquellos componentes peligrosos y difíciles de tratar en condiciones normales ya que son poco o nada biodegradables. Desde hace más de 20 años está funcionando en Harlingen (Texas, EE UU) una planta capaz de tratar 5.700 kg MS/h de fango seco, y existen otras en la UE y Japón.

El agua supercrítica es un excelente medio para la oxidación de corrientes húmedas, en particular aquéllas que contienen tanta agua que no son aptas para la incineración. El punto crítico del agua se alcanza a 374 ℃ y 22,1 MPa. En estas condiciones el agua actúa como un potente disolvente no polar. Muchos compuestos orgánicos y gases ligeros, como el oxígeno, son altamente solubles en agua supercrítica.

Para el tratamiento se añade oxígeno en la proporción estequiométrica correspondiente a la cantidad de materia orgánica presente en el fango. El fango a tratar contiene un 15% de materia seca (la concentración depende del calor que puede liberar la oxidación. Si hay mucha materia orgánica es preciso diluir) y una bomba lo introduce en el reactor a una presión de 250 bar (la bomba consume del orden de 0,3 kWh/kg MS fango). El oxígeno es añadido al precalentador y su consumo es de alrededor de 0,7 kg O_2/kg MS fango. El calor de la oxidación de la materia orgánica alcanza los 570 ℃ y es usado para «*district heating*»; ello se lleva a cabo en la planta de Göteborg, Suecia. La Figura 12.52 muestra el principio de funcionamiento de la planta de Goteborg.

Como se ve, se trata de un proceso exotérmico y la eficacia de la reacción (oxidación) aumenta con la temperatura, estableciéndose una temperatura de reacción de 650 ℃. Los tiempos de reacción son inferiores a un minuto, llagándose a eficacias del 100%.

El carácter no polar del proceso hace que las sales polares inorgánicas precipiten, pudiendo entorpecer el proceso y produciendo abrasión en diferentes partes de la instalación.

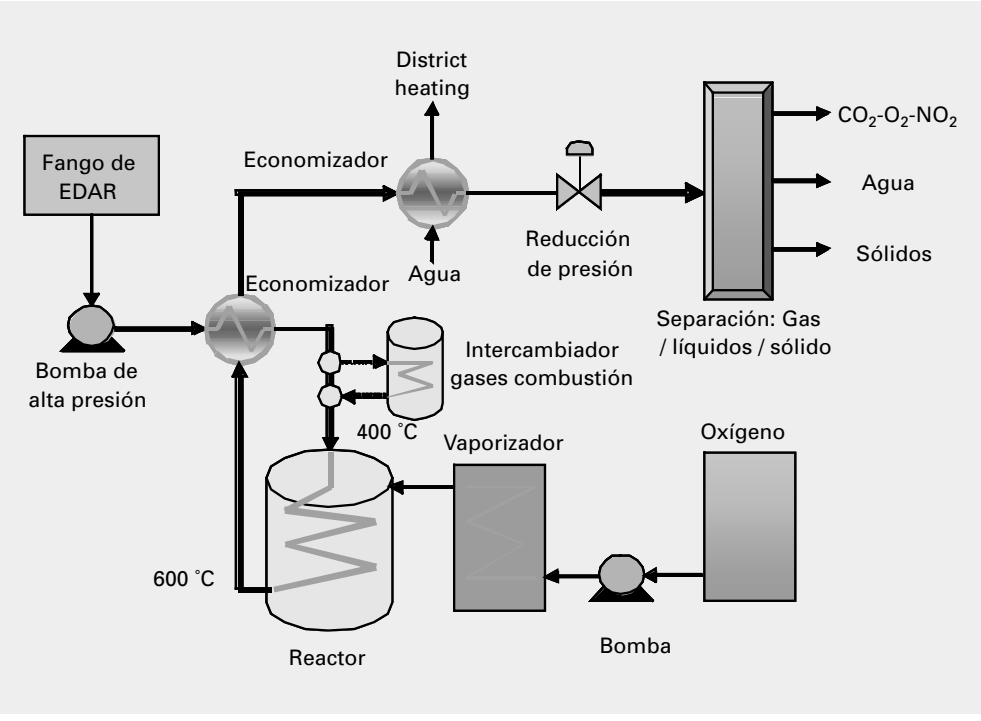


Figura 12.52. Principio de funcionamiento de un tratamiento de fangos por oxidación supercrítica.

7.7.2. La hidrólisis térmica

Literalmente el término significa romper las largas cadenas moleculares *(lysis)* en presencia de agua *(hidro)* por medio de la aplicación de calor. En términos técnicos ello se traduce en la introducción de los fangos en un reactor a presión, que hace estallar las células de los microorganismos presentes, rompiendo las grandes moléculas y haciendo de este modo el producto biosólido realmente digerible, puesto que, como es bien sabido, la digestión anaerobia depende del grado de digestabilidad de la materia orgánica presente. Los sólidos en disolución son más degradables que los que se hallan en suspensión.

La desintegración mecánica, por si sola, no cambia la estructura celular de los elementos presentes, tan sólo hace aumentar la superficie específica del conjunto lo que facilita la separación mecánica. Durante el proceso de hidrólisis térmica se rompen las paredes celulares y polímeros, lo que incrementa la biodegradabilidad de la materia orgánica.

A alta temperatura, los polímeros y células se hidrolizan y se transforman en azúcares y ácidos. La materia orgánica rápidamente se acidifica y da lugar a grandes cantidades de ácidos grasos, que son muy degradables. Este proceso ha sido desarrollado a escala industrial por Cambi THP.

Una ventaja adicional del proceso es que el volumen de los digestores es mucho menor que los convencionales. Finalmente, al tratarse de un proceso más eficiente, el grado de deshidratación es superior al de los sistemas tradicionales, alcanzándose un contenido en materia seca del 35%.

En el DVD adjunto, en el punto 13, se muestra información complementaria sobre la hidrólisis térmica.

7.7.3. Tratamiento con cal

La adición de cal a los fangos es un sistema tradicional para reducir los niveles de olor y la reducción de los microorganismos y patógenos que no pueden sobrevivir en un rango de pH hostil. Dentro de los sistemas de tratamiento de fangos cabe citar el proceso ALCHIMIX que, en esencia, se trata de un proceso fisicoquímico que permite la obtención de un material casi seco como consecuencia de la adición de cal viva al fango de EDAR. En realidad es una opción de estabilización con cal que eleva el pH hasta 12, lo que facilita la precipitación de algunos metales.

En contacto con el agua del fango, la cal se hidrata mediantre un proceso exotérmico, cuyo calor se emplea para evaporar parte del agua. Se añade una cantidad de cal importante, ya que la temperatura de salida del fango supera los 100 ℃. A la vez, la portlandita formada sirve para encapsular e inmovilizar el resto de fango residual. A la larga, la reacción básica es la encapsulación en una matriz de carbonato, o de fosfato, según se quiera. Een teoría el proceso es:

- $Ca^{2+} + 2HCO^{-}_{3} + CaO \rightarrow 2CaCO_3 + H_2O$
- $2PO^{3-}_{4} + 6H^{+} + 3CaO \rightarrow Ca_3(PO_4)_2 + 3H_2O$

En el caso citado, el proceso se lleva a cabo en un reactor del que se emite vapor de agua, volátiles (evaporados debido a la temperatura) y material particulado que, obviamente, deben ser depurados. Por otro lado, el material obtenido deberá destinarse a rellenos o a vertedero en función de la caracterización del fango a tratar.

Desde el punto de vista de la sostenibilidad, no deja de ser un sistema que precisa una materia prima (CaO), que si bien es barata, su generación genera un potente efecto invernadero. La cal no se encuentra en la naturaleza y hay que fabricarla a base de descomponer el carbonato, empleando combustible fósil y, obviamente, emitiendo el 50% en peso del carbonato en forma de CO_2; además, el material resultante del proceso es complicado para su valorización.

Para llevar a cabo, con garantías, un proceso de estabilización en medio alcalino se deben analizar cuidadosamente los siguientes parámetros:

- Características del fango a procesar.
- Tiempo de contacto y pH.
- Dosificación y alimentación de la cal.
- Mezcla del líquido y condiciones de reacción.

7.7.4. La pirólisis de fangos como circuito cerrado de energía

En la pirólisis desarrollada por la firma DTV *(Dissociation Thermique et Valorisation)* los fangos, una vez secos, son introducidos en un termolizador especialmente diseñado para el tratamiento de los fangos secos para generar dos productos:

- *Una fracción gaseosa* (que naturalmente está compuesta de gases combustibles y vapores que a esta temperaturas no condensan y salen con la corriente de gases), que posteriormente será oxidada en una cámara de combustión para

valorizar la energía en una caldera. La energía térmica se emplea para el calentamiento del reactor de pirólisis y en el secado del propio fango. Después los gases pasan por una etapa de lavado, más o menos complicada, en función de los componentes presentes en el fango, antes de su expulsión a la atmósfera.

- *Una fracción sólida*. Compuesta esencialmente por carbono. En términos de masa esta cantidad es del orden del 31% de la materia entrante en el termolizador, lo que con frecuencia constituye un problema para su posterior uso. Una aplicación sería su empleo en hornos de clínquer.

El termolizador trabaja a una temperatura de 500 ℃, el tiempo de residencia es de casi una hora y funciona en régimen de depresión (50 mbar). Al funcionar en régimen reductor, la mayoría de los metales presentes permanecen en esta fase sólida, lo que significa que los gases generados contienen menos metales. Es decir, son más limpios y no habrá necesidad de inyectar tanto carbón activo como debe hacerse en un sistema convencional de tratamiento de gases.

En el DVD adjunto, en el punto 14, se muestra información complementaria sobre sistemas de pirólisis de fangos.

8. Vitrificación de los residuos secundarios de los procesos térmicos

La parte inorgánica procedente de la gasificación o de la incineración de los fangos estándar de EDAR corresponde, aproximadamente, al 35% de la fracción seca del fango. La vitrificación es una tecnología apropiada para tratar los residuos secundarios y, además, permite su reciclado posterior para transformarlos en óptimos materiales de construcción.

Un vidrio puede definirse como un *líquido subenfriado de viscosidad infinita*, teniendo apariencia sólida a temperatura ambiente a causa del aumento, casi infinito, de la viscosidad de la masa fundida. Disponen de una estructura amorfa diferente de la estructura cristalina que caracteriza los estados sólidos habituales.

Las sustancias en general, y los residuos en particular, tienen una estructura cristalina. En ésta, las celdillas elementales se disponen con una ordenación geométrica en el espacio formando una red perfectamente definida. En el proceso de fusión, primera etapa para la obtención de un vidrio, a medida que la temperatura va en aumento, el calor distorsiona la red molecular hasta transformarla en una estructura reticulada al azar (estructura amorfa).

A mayor temperatura, algunos enlaces se rompen y aparece la posibilidad de inserción de metales pesados en la estructura del vidrio. Esta es la posibilidad que ofrece esta tecnología al tratamiento fangos de EDAR; la oportunidad de incorporar compuestos inorgánicos altamente tóxicos a la red amorfa de un vidrio convierte a esta tecnología en la más segura para el tratamiento de ciertos residuos, puesto que los productos tóxicos no podrán escapar de su confinamiento. A su vez, esto sugiere otra alternativa: transformar un residuo peligroso en un material inerte y, por tanto, valorizable.

Para eliminar completamente, o valorizar, el polvo resultante del proceso de gasificación de los fangos de EDAR, es preciso dar una solución a los polvos de filtro resultantes que, por otra parte, concentran toda la contaminación original de los fangos. La vitrificación es un proceso por el cual se funde un conjunto de materiales y posteriormente se enfrían, con lo que se consigue una naturaleza unitaria en el producto de salida. Para lograr la fusión es preciso alcanzar una temperatura muy elevada: unos 1.400 ℃, según la naturaleza de los componentes.

8.1. EL HORNO DE VITRIFICAR RESIDUOS SECUNDARIOS DE FANGOS DE EDAR

En esencia, como esquematiza la Figura 12.53, el horno de vitrificar residuos consta de una balsa en cuyo interior se halla el material a fundir (las cenizas de fangos de EDAR no funden por si solas y hay que agregar algún aditivo, como se explica ampliamente en el Capítulo 7 de esta obra). En el interior de la balsa existe una determinada cantidad de electrodos. Cuando el material funde (efecto que durante la puesta en marcha debe realizarse con un quemador auxiliar de gas) se torna conductor. A partir de este momento se puede apagar el quemador auxiliar.

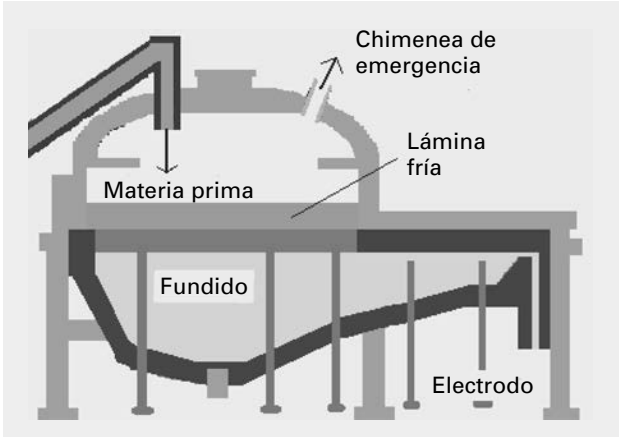


Figura 12.53. Esquema de funcionamiento de un horno eléctrico.

El material, como muestra la Figura 12.53, fluye por la parte inferior y efectúa un recorrido longitudinal y finalmente ascendente. Con ello se logra un tiempo de residencia del vidrio muy prolongado que ayuda al afino. Finalmente, el material se vierte por la parte superior (de hecho hace una especie de sifón), controlándose de esta manera la viscosidad y el caudal de forma exacta.

Este tipo de horno de «capa fría», a igualdad de producción, tienen un volumen sensiblemente menor que los convencionales de gas o de combustible líquido, con lo que se reducen las pérdidas de calor a través de las paredes.

La carga a vitrificar se introduce por medio de un robot sobre el material fundido en toda su superficie, como indica la Figura 12.54 (horno de la firma HORN; imagen cedida por gentileza de TTRES). De esta manera se logra una capa de material aislante donde la cara interna se halla a la temperatura del baño (1.500 ℃), mientras que la superior está sobre los 80 ℃.

Esta capa de material constituye una de las ventajas técnicas y ambientales del horno. De hecho, actúa como bóveda del horno. No obstante, el horno tiene su propia bóveda, que es indispensable para la puesta en marcha, además de prevenir cualquier emergencia. Asimismo, la bóveda tiene una chimenea para evacuar los gases de combustión durante su puesta en marcha y en explotación, además del CO_2 procedente de los carbonatos o el vapor de agua procedente de las materias primas.

El sistema de carga y repartición de la materia prima se comprende que sea uno de los secretos mejor guardados (y patentados) de la fusión eléctrica, ya que de su buen funcionamiento depende la calidad del vidrio o las emisiones. Los diversos electrodos repartidos por el interior de la masa consiguen una fusión homogénea de las materias primas. A medida que el material funde la masa se compacta, aumenta la densidad y cae al fondo. En la solera, el horno dispone de una salida de emergencia para el caso de tener que proceder a un vaciado del líquido.

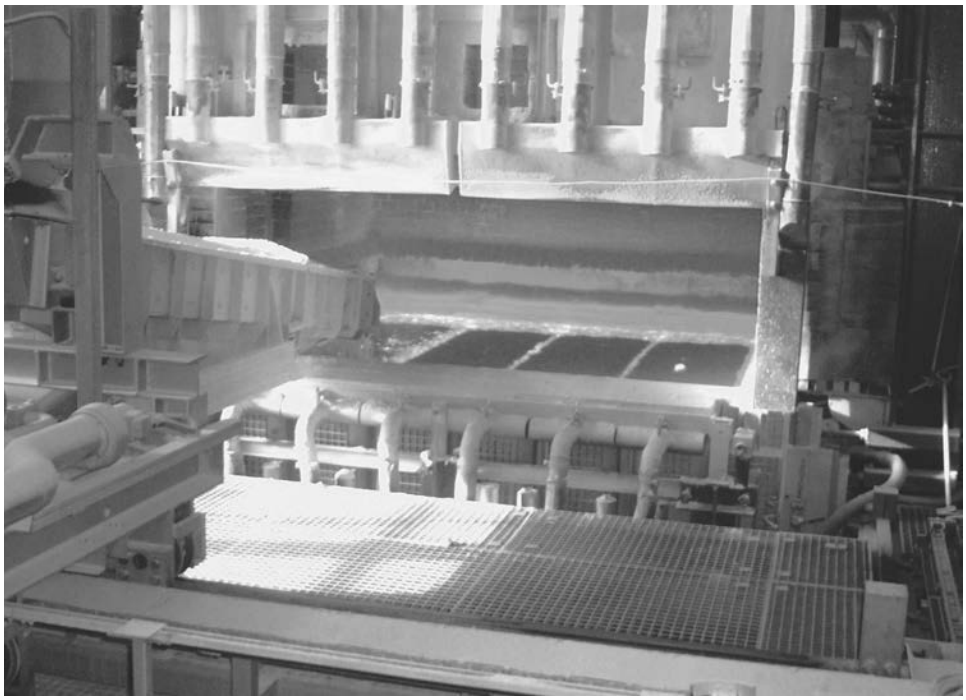


Figura 12.54. Vista de la alimentación del horno eléctrico Horn. Capa aislante.

8.1.1. Los halógenos y los metales pesados

En la formulación de vidrios convencionales, la finalidad de este grupo de sustancias (sales de metales alcalinos, ciertas sales halogenadas y óxidos de ciertos metales volátiles) es favorecer la formación de vidrio, rebajando su temperatura de fusión. Los óxidos que así actúan son los denominados modificadores de red o, simplemente, fundentes.

La presencia de estos fundentes está presente en los fangos de EDAR, al margen de los que se adicionan para la vitrificación. Es importante resaltar la reducción de emisiones que se puede alcanzar con la vitrificación en hornos de «capa fría». Los fluoruros, por ejemplo, constituyen un buen ejemplo de ello.

El empleo de sustancias fluoradas presenta el grave inconveniente de su elevada volatilidad, que se traduce en una fuerte corrosión de los materiales refractarios y un peligroso agente contaminante para el medio ambiente. El uso de fundentes fluorados con respecto al problema de las emisiones, como la criolita ($Na_3Al\ F_6$) o el espato flúor (CaF_2), ambos muy abundantes en la naturaleza, no radica en el contenido de flúor en sí, sino en la forma de fusión.

Una ventaja de los fluoruros, en combinación con el sodio, es la formación de eutécticos de bajo punto de fusión. Así, a 660 ℃ se forma el eutéctico $NaF\text{-}Na_2CO_3$. Todo ello, como es obvio acelera la reacción con la sílice y adelanta la formación de vidrio. A temperaturas elevadas los iones fluoruro reaccionan con la sílice formando SiF_4 muy volátil (de ahí la importancia de trabajar con fusión eléctrica), a la vez que el óxido de cal se incorpora al vidrio, según la siguiente reacción:

$$2CaF_2 + SiO_2 \rightarrow SiF_4 + CaO$$

Otro tanto podría decirse de ciertos compuestos de cloro. En resumen, la forma de llevar a cabo la fusión, o de evitar el escape de halógenos, además de mejorar el ambiente abre nuevas posibilidades, como es la incorporación de los polvos de filtro resultantes del tratamiento de gases al horno vitrificador.

Todo ello es de vital importancia para el tratamiento de las cenizas ya que, en el sistema de depuración de gases por vía seca, o semiseca, las cenizas se recogen junto a las sales procedentes de la neutralización y el carbón activo que, a su vez, ha adsorbido gran cantidad de metales e hidrocarburos. El material en su conjunto puede vitrificarse, lo que sería impensable en un horno vitrificador convencional.

8.2. EL MATERIAL VITRIFICADO

La forma normal del vitrificado a la salida del horno suele ser un material muy duro y del tamaño de la arena de la playa (denominado frita), que se consigue cuando el líquido incandescente se vierte sobre agua. Esto permite una posterior valorización para su uso como árido para la fabricación de morteros u hormigones, o bien su empleo para la fabricación de firmes de carretera.

Otra aplicación que es la propugnada para la valorización de los fangos de EDAR es el acabado en forma de baldosa, como el ejemplar que aparece la Figura 12.55 (la foto corresponde al pavimento del andén de una estación del metro de Barcelona realizada con material de este tipo).

El color más habitual en las vitrificaciones de fangos es el marrón oscuro, debido a la presencia masiva de hierro. A las temperaturas de formación de vidrio, el hierro se difunde por toda la masa y le confiere el color marrón característico. La presencia de otros cationes cromóferos, la mayoría de ellos de valencia dos y tres, como cromo, níquel, cobre, etc., ayudan a obscurecer el color.

En este sentido se podría creer que el color definitivo de todo material vitrificado es el marrón. Esto es verdad a partir de las bases antes expuestas; no obstante, la tecnología moderna permite proporcionar cualquier tipo de color o clase de acabado superficial, con lo que la posibilidad de usar este vitrificado para suelos, alicatados y pavimentos es infinita.

8.3. EL PROCESO DE RESIDUO CERO EN LA VALORIZACIÓN DE FANGOS

El esquema de la Figura 12.56 reproduce el diagrama de proceso general de fabricación explicado por

Figura 12.55. Pavimento con baldosa vitrificada a partir de fangos de EDAR.

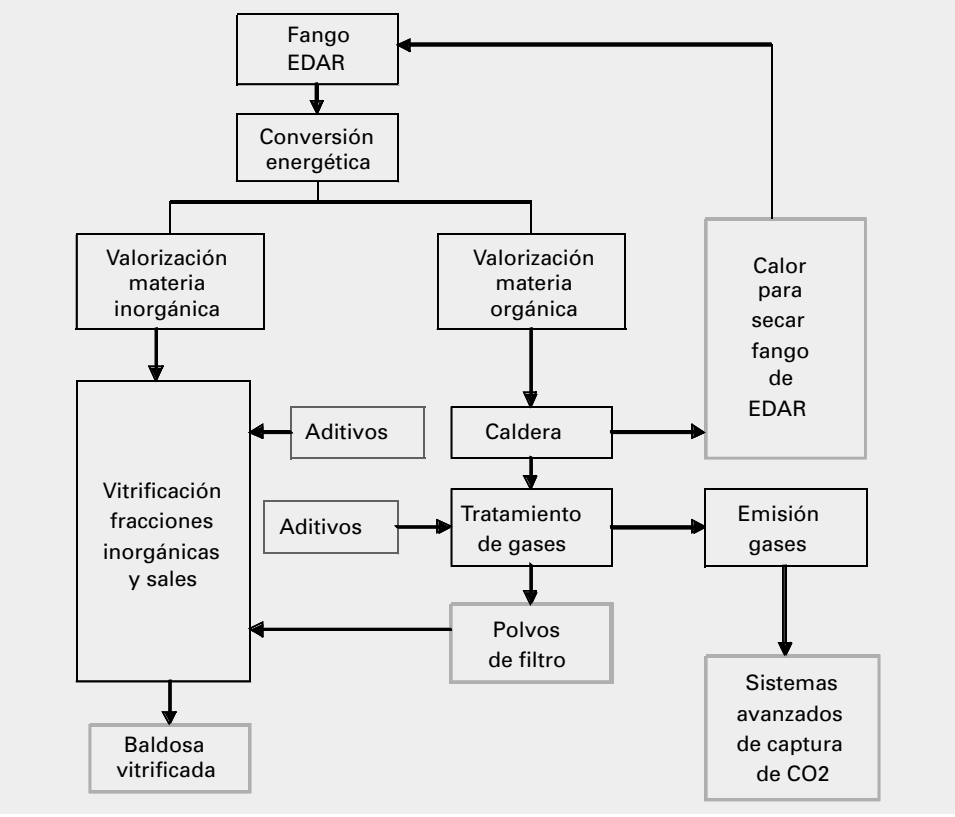


Figura 12.56. Esquema general de tratamiento de residuo cero.

partes a lo largo del presente capítulo. Conduce a un proceso de residuo cero, donde los cuadros que aparecen en el esquema corresponden a las siguientes secuencias:

1. Reactor de gasificación, cámara de oxidación y postcombustión para el tratamiento térmico de fangos de EDAR.
2. Caldera de recuperación de calor. El calor se envía a un secador de fangos para que proporcione la sequedad precisa para el ingreso de fangos a la gasificación.
3. Sistema de tratamiento de gases. El residuo generado, polvos de filtro, se envía al horno de vitrificación.
4. Horno de vitrificación eléctrico de emisión cero, para la inertización de las cenizas de fangos de EDAR y los polvos de filtro con la ayuda de los aditivos.

El esquema de la figura corresponde a la gasificación seguida de oxidación del gas de síntesis y valorización en ciclo de Rankine. Con ligeras diferencias también podría reproducir un proceso de gasificación y producción de electricidad ya sea en motor o turbina de gas. El concepto fundamental es:

- Que la materia orgánica del fango sirva para cerrar el ciclo de energía y no se precise aportación energética alguna del exterior.
- Que la fracción inorgánica resultante se vitrifique y se valorice en forma de material de construcción. Al no existir residuo secundario alguno, el proceso corresponde a un ciclo de «residuo cero».

Como resumen se pueden destacar las siguientes ventajas:

- Se consigue eliminar la compra de energía para todo el proceso de tratamiento de fangos deshidratados: la única energía entrante en el sistema es la electricidad precisa para la vitrificación. En plantas de gran tamaño, el sistema permite generar energía eléctrica y minimizar la compra de electricidad.
- No hay residuo del proceso. Todo el material se valoriza en forma de baldosa vitrificada.
- Es un sistema de emisión neutra. Los gases emitidos, que obviamente cumplen con el Real Decreto 653/2003, sólo contienen CO_2 y H_2O que, además, pueden enviarse a un sistema avanzado de captura de CO_2. De todas maneras se trata de gases de efecto neutro de cara al Protocolo de Kyoto, ya que proceden de un combustible renovable.

9. Vértidos de los fangos

Si bien en la actualidad este sistema constituye la forma mayoritaria de tratamiento, se estima que en poco tiempo disminuirá drásticamente por diversos motivos:

- La Directiva europea sobre vertido (1999) limita claramente los niveles de materia orgánica que se pueden verter. La misma Directiva restringe, o prohíbe, el vertido de materias reciclables y combustibles, y los fangos de EDAR son ambas cosas.
- Los costes de vertido se incrementan año tras año, aunque todavía se hallan a años luz de los precios que pagan países de nuestro entorno. El aumento de costes obedece tanto a limitaciones de espacio (es el caso de Cataluña) como a la paulatina adecuación de los vertederos a las normas vigentes.
- Los costes derivados de los pretratamientos que en un futuro será necesario llevar a cabo en los fangos antes de su vertido.

De todo ello se colige que, si bien por ahora el deposito controlado es la opción más utilizada para el tratamiento de fangos, muy pronto dejará de serlo y las administraciones responsables deberían tomar nota para obrar en consecuencia. En algunos países, como Suiza, hace años que se ha prohibido el vertido de fangos. A título de ejemplo, en Francia, el coste de vertido era, en 2005, de 100 €/t, sin contar el transporte

9.1. COSTES DE VERTIDO DE FANGOS DE EDAR

El presente apartado hace referencia, de manera exclusiva, a los vertederos que admitan fangos de EDAR, ya sean secos o deshidratados. En el caso concreto de Cataluña, la Directiva 1999/31/CE, relativa al vertido de materia orgánica en los depósitos controlados, ha de tener un fuerte impacto en relación a la futura gestión de fangos. Según el artículo 5 de la citada Directiva anterior, los Estados miembros de la UE han de elaborar una estrategia nacional que les permita establecer la reducción de los residuos biodegradables en tres fases: reducción del 25%, 50% y 65% respecto a la producción del año 1990, hasta el 2016 como último plazo. Ello no hace más que poner más presión sobre el sistema de vertido como vía de gestión de residuos.

Dejando de banda estas premisas, pero sin sobrepasar la ley de la oferta y la demanda, la penuria de los vertederos hará que los precios aumenten significativamente. No hay que olvidar que en algunos países el vertido está prohibido, mientras que en otros el precio duplica las cifras presentadas en la Tabla 12.27.

Tabla 12.27. Incremento previsto del coste del vertido de fangos de EDAR

INCREMENTO DEL COSTE PREVISTO DEL VERTEDERO						
	2005	**2006**	**2007**	**2008**	**2009**	**2010**
		10%	10%	10%	10%	10%
Precio medio de vertido (€/t)	57,0	62,7	69,0	75,9	83,5	91,8

El precio de vertido se desglosa en 42 €/t en concepto de gestión en depósito propiamente dicho y 15 €/t por transporte. La previsión del aumento de los costes en los vertederos controlados es moderada (la propia administración ambiental catalana marca unos incrementos superiores y la referencia europea es, todavía, superior). Sin embargo, para analizar la tendencia futura, parece preferible encarar la evolución de los precios con una visión más conservadora puesto que:

- El vertedero es el parámetro de mayor peso específico en la estructura de costes del sistema actual de postratamiento de fangos de EDAR: el secado térmico.
- El vertido puede ser sustituido, en teoría, por otras vías de postratamiento (aplicación al suelo, compostaje, etc.

9.2. INCIDENCIA DE LA DIRECTIVA 1999/31/CE, RELATIVA AL VERTIDO DE RESIDUOS ORGÁNICOS, RECICLABLES Y COMBUSTIBLES

En el artículo 2, apartado m, de la Directiva 1999/31/CE se definen los «residuos biodegradables» como todos aquellos residuos que puedan descomponerse de forma aerobia y anaerobia, tales como residuos de alimentos y de jardín, el papel y el cartón. Esta definición es muy importante de cara a las futuras emisiones de los gases de efecto invernadero relacionados con el Protocolo de Kyoto.

Como consecuencia de esta Directiva, la gestión de fangos de EDAR en depósitos controlados, está muy limitada desde 2005 en Alemania y prohibida desde el año 2004 en Austria; en Suiza no se autoriza el vertido desde el año 2000, mientras que en Francia tampoco existe, en la práctica, esta vía de gestión.

En Cataluña, a causa del Plan Nacional de Lodos, de la particular distribución urbana, orografía y carencia de fuentes energéticas, la Directiva 1999/31/CE actuará como revulsivo para disminuir el vertido como vía de gestión y seguir una política de aprovechamiento energético de fangos parecida a la de los países anteriormente citados.

10. Los fangos y lodos industriales

En la terminología ambiental se denominan fangos industriales a los generados en las industrias. Existen infinidad de topologías de estos fangos, tantos como clases de industrias y tipos de depuración empleados; por tanto sería un trabajo ímprobo y poco eficiente intentar hacer una descripción de los mismos. Sin embargo, todas las aguas industriales tienen una característica en común: que vierten a las depuradoras de aguas residuales urbanas.

La Tabla 12.28 muestra los contaminantes industriales más corrientes y los problemas en las descargas en las EDAR públicas.

Tabla 12.28. Principales contaminantes de las aguas industriales

Contaminante	Concentración limitante para las EDAR convencionales	Explicación de la causa limitante	Caso de ser aceptado, el pretratamiento requiere...
Flujo/caudal	Agua industrial superior al 50% del agua residual municipal.	Las aguas industriales pueden influir en el sistema debido al diseño de la EDAR.	Equilibrado y dosificación. Reciclaje en la industria para reducir el vertido. Rediseño de la EDAR, o parte de ella.
DBO	> 300 ppm	La gran cantidad de O_2 que exige un agua con elevada DBO.	Tratamiento biológico. Equilibrado y dosificación. Cambios en el proceso industrial.
Color	Visible en diluciones de 4 partes de agua urbana por 1 de industrial.	Las EDAR no suelen eliminar el color.	Hay que eliminar el color en la depuradora industrial o hacer cambios en el proceso.
Sólidos en suspensión	> 350 ppm	Mayores proporciones desequilibran el funcionamiento de la EDAR.	Colocar una cámara de sedimentación previa a la EDAR o modificar el proceso.
pH	Inferior a 5,5 o superior a 9,0	Fuera de estos límites provoca corrosiones y distorsiones en el biológico.	Es preciso neutralizar mejor, homogeneizar o llevar a cabo cambios en el proceso.
Grasas	> 100 ppm	Interfiere en la aireación y en la sedimentación primaria. Afecta también a los fangos.	Colocar trampas para grasas. Modificaciones en el proceso industrial.
Cr, Sn, Pb, Zn, Hg, Cu, Ni, etc.	> 1 ppm para Cu, Cr y 5 ppm para Zn y Ni	Inhiben la actividad biológica, en especial en los digestores de fangos.	Pretratamiento químico y sedimentación.
Inorgánicos y otros productos tóxicos	Cantidades superiores a los límites de toxicidad para las bacterias y animales superiores.	Suelen ser tóxicas para los tratamientos biológicos y afectar a la salud de animales y personas.	Cambios en los procesos. Usar sistemas avanzados de pretratamientos.
Inflamables, espumantes, cenizas, alquitranes, vidrios, etc.	No en cantidades que puedan representar un peligro.	Causan interferencias en las EDAR urbanas.	Hay que eliminar estas sustancias por métodos físicos o químicos.
Aguas de tormenta	No deben conducirse a las EDAR	Ocupan un gran volumen que debe reservarse a las aguas urbanas e industriales.	Construir colectores separados.
Materia orgánica poco degradable	Ninguna.	Normalmente impiden la reutilización de las aguas.	Hacer tratamientos de adsorción por carbón activo o cambios en el proceso industrial.
Minerales	B < 0,7 ppm NaCl < 1.000 ppm	Normalmente impiden la reutilización de las aguas, sobre todo para riego.	Pretratamiento por membranas o cambios en los procesos industriales.

Diversos estudios sobre la transferencia de contaminación de las aguas residuales a los fangos concluyen que buena parte de los metales pasan a los fangos. Así, el hierro lo hace de forma mayoritaria (75%), el Zn en un 42%, seguidos de Cu, Hg y Mn, con valores alrededor del 25%, además de altos contenidos de N y P. De ello se desprende que cuanto mayor sea la proporción de agua industrial en el agua residual urbana, mayor será la presencia de metales en las aguas depuradas. Una de las líneas más prometedoras de investigación parece ser el uso de silicio manoestructurado para la adsorción de metales.

En el proceso de transferencia de contaminantes a los fangos la deshidratación juega un papel trascendental y el proceso más eficaz parece ser el de los fangos activados. Sin embargo, hoy en día existen procesos más efectivos, como el de electrocoagulación en el que se garantiza la transferencia de metales al fango y la eliminación de la DQO.

Por lo general, los fangos de EDAR generados a partir de un agua residual urbana y una industrial suelen tener más problemas de valorización que los procedentes exclusivamente de las aguas urbanas. Desde el punto de vista del reciclaje la ventaja que tienen los fangos industriales es la uniformidad, lo que, por complicado que sea el proceso, facilita la valorización.

En líneas generales, los fangos de naturaleza básicamente orgánica se pueden valorizar energéticamente, mientras que los lodos, de naturaleza esencialmente inorgánica, se deberían destinar a la valorización material, por ejemplo, como materia prima para la fabricación de cerámica o clínquer, en la hipótesis, claro está, de que la caracterización sea compatible con el proceso.

Bibliografía

CAZURRA, T. *et al.* Secado térmico de fangos de estaciones depuradoras de aguas residuales. *Tecnología del Agua*, núm. 184. 1999.

COLIN, F. *Recent developments in sewage sludge processingeur* 13650 Elsevier, Amsterdam.

DEGRÉMONT . *Water treatment hanbook*, 6th edición. Lavoisier, París 1991.

DEMONSTRATION PROJECTS. Assessment of incineration of industrial wastes. EUR 14136 en. Ed. Commission of the European Communities 1998.

DIRECTIVA 200/76/CE y RD 653/2003 relativo a la incineración de residuos.

ELIAS, X. (1980). The formation and consequences of black core in ceramic ware. *Revista Interceram*, vol. 29, núm. 3, pág. 380-384.

ELIAS, X. (1994). Materiales cerámicos para la construcción fabricados con lodos de estaciones depuradoras: Ecobrics. *Conferencia anual ATEGRUS*, 1994, Madrid, Junio 1994, Libro de conferencias, págs. 89-101.

ELIAS, X. Aler *Árido ligero expandido fabricado con fangos de EDAR*. Centro Nacional de Producción Mas Limpia y Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín (Colombia) 2002.

ELIAS, X. Posiblidades de la pirólisis en el tratamiento de los residuos. *Revista Residuos*. Núm. 68. Noviembre 2002.

ELIAS, X. *Reciclaje de residuos industriales*. Madrid, Ed. Díaz de Santos (2000).

ELIAS, X. Secado y tratamiento de fangos de EDAR. *Revista Tecnología del Agua*. Julio 2002.

ELIAS, X. *Tratamiento y valoración energética de residuos*. Madrid, Ed. Díaz de Santos (2004).

ELIAS, X. *Curso sobre incineración de residuos sólidos, líquidos y hospilatarios*. Ciudad de México, 2002.

EXPORECYCLING'98. *Nuevas vías de valoración de fangos*. II Forum Ambiental. Borsa de Subproductes de Catalunya 1998.

GOUMANS, J. J. J. M. *Waste materials in construction*. Elsevier, Amsterdam, 1991.

LOBATO, J. *et al.* Eliminación de cromo (VI) en los cementos. *Ingeniería Química* (Febrero 2004).

MATA, J. *et al.* Digestión anaerobia de aguas residuales urbanas: posiblidades y límites. *Tecnología del Agua*, núm. 271. 2006.

MÉNDEZ , I. La gasificación integrada en el ciclo combinado. Ibérica. *Actualidad Tecnológica*, Febrero de 2004.

MÜLER , R. *et al.* Sludge solutions. Process options for the incineration of sewage sludge. *Waste Management World*. Nov-Dec 2005.

NAVARRO, M. *et al.* Riesgo sanitario por bioacumulación de metales pesados derivado de la aplicación al suelo de lodos y RSU. *Revista Residuos*. Núm. 53 (2001).

PAUL, N. *Cheremmisinoff. Sludge. Management and disposal*. Ed. Prentice-Hall International. New Jersey.

PUTZEISTER IBÉRICA S.A. Combustión de lodos residuales de EDAR en centrales térmicas de carbón. *Tecnología del Agua*, 245. (2004).

RICHARD PORTER. *Energy savings by waste recycling*. Elsevier. Amsterdam,

ROBUSTÉ, J. *Tractament dels fangs*. Curs de Medi Ambient. Escola Universitaria d'Enginyeria Técnica Industrial d'Igualada. (1995).

RODRIGUEZ ANDARA, A. *et al.* Influencia del tamaño de las partículas en la degradación anaerobia en la fracción sólida de efluentes de origen porcino. *Tecnología del Agua*, núm. 208 (2001).

RONALD F. *Synthetic fuels*. International Estudent Edition. Ed. McGraw-Hill. New York.

SEVILLA, M. *et al.* Gestión de lodos de depuradora. Aspectos económicos. *Revista Residuos,* núm. 87 (2005).

SVANSTRÖM , M. *et al.* Environmental assessment of supercritical water oxidation and others sewage sludge handling options. *Waste Management Research*, 2005:23.

TRAVIS P. WAGNER. *The hazardous waste Q & A*. Ed. Van Nostrand Reinhold. Amsterdam.

WILLIAM S. F. *Waste minimization and clean technology: wate managenet strategies for the future*. Ed. Academic Press. New York.

Los plásticos residuales y sus posibilidades de valoración

13

Xavier Elias, Lorena Jurado

ÍNDICE

1. Introducción 999
1.2. Consumo estimado de plásticos 1001
2. Tipos y características de plásticos 1001
2.1. Termoplásticos 1002
2.2. Termoestables 1003
2.3. Materiales compuestos 1003
2.4. Aditivos plásticos 1003
3. Características de los plásticos en orden a su reciclado 1004
3.1. Polietileno de alta densidad (PEAD o HDPE) 1006
3.2. Polietileno de baja densidad (PEBD o LDPE) 1006
3.3. Polietileno tereftalato (PET) 1007
3.4. PVC 1008
3.5. Polestireno (PS) 1010
4. Flujo de residuos plásticos 1011
4.1. El plástico en los residuos municipales: envases 1012
4.2. Plásticos en automoción 1017
4.3. Plástico en la construcción 1017
4.4. Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) 1019
4.5. Plásticos agrícolas. 1020
5. Vías de reciclaje 1023
5.1. Reciclado mecánico 1023
5.2. Reciclado químico 1025
5.3. Reciclado mecánico/energético 1027
6. Tendencias futuras. Bioplásticos 1028
6.1. Ácido poliláctico (PLA) 1028
6.2. Polihidroxialcanoatos (PHA) 1029
6.3. Otros biopolímeros 1030
6.4. Los bioplásticos y su futuro como fracción de residuos 1031
Bibliografía 1032

RESUMEN

El plástico, por su versatilidad y facilidad de procesado, se ha convertido en un material omnipresente en la sociedad para el que en muchas aplicaciones no existe sustituto. Tiene sin embargo dos problemas, es de origen fósil y es difícil reciclar mecánicamente (recuperar materialmente) la totalidad de residuos plásticos que se generan. Los bioplásticos, aún por desarrollar comercialmente, pueden ser en el futuro la solución parcial al primer problema. En cuanto al reciclado, parece improbable salvar todas las dificultades: dispersión en el territorio, multiplicidad de formulaciones, mezclas y suciedad o degradación de los materiales.

Este capítulo hace un repaso de la gestión actual de diferentes flujos de residuos plásticos e introduce a la situación actual de los bioplásticos. Son campos en continuo avance y es de esperar en los próximos años asistir a cambios sustanciales en los modelos de gestión para adaptarse a las nuevas tecnologías.

1. Introducción

El origen de los plásticos data del año 1920 en el que el profesor Staudinger definió la macromolécula. En los años 40 y 50 proliferó la investigación en polímeros y sus mecanismos de formación. En los años 60 se conoció en profundidad la estructura y las interacciones con otras sustancias que mejoraban sus propiedades. Posteriormente, se profundizó en el conocimiento y optimización del procesado para, finalmente llegar a la época actual con el desarrollo de polímeros y plásticos diseñados para ofrecer las más altas prestaciones. Los polímeros o resinas son materiales orgánicos compuestos por moléculas de gran tamaño, cadenas largas de unidades moleculares, monómeros, que se pueden dar tanto en productos sintéticos como en la naturaleza. Frecuentemente se utiliza el término polímero como sinónimo de plástico, pero aunque todos los plásticos están basados en polímeros, no todos los polímeros los consideramos plásticos, como por ejemplo la seda, un polímero natural.

Los plásticos son polímeros que, junto a los aditivos apropiados ofrecen materiales con excelentes propiedades térmicas, aislantes, resistencia a ácidos, bases y disolventes y de ratio resistencia/peso. Se entiende por plástico, pues, cualquier material formado principalmente por algún polímero natural o sintético con sus aditivos correspondientes para conferirle las características deseadas.

La gran variedad de plásticos se debe al amplio espectro de productos que se fabrican con ellos y a que se diseñan materiales que ofrezcan las propiedades necesarias a lo largo de la vida útil de los productos que se desean fabricar.

Actualmente se pueden destacar unos grupos de polímeros en fase de desarrollo según sus propiedades: piezoeléctricos, conductores, de alta resistencia térmica, fotosensibles, con propiedades ópticas no lineales. Estos avances explican la diversidad de materiales poliméricos existentes en el mercado, en muchos casos diseñados específicamente, lo que los diferencia de otras familias de materiales como los vidrios o los metales.

Se utilizan polímeros unidos covalentemente a reactivos químicos como catalizadores, es el caso de las resinas de intercambio iónico o las aplicaciones en medicina o agricultura en las que el material interactúa con el medio liberando progresivamente el fármaco o fertilizante. La complejidad y novedad de estos materiales y el hecho de que sean aplicaciones que suponen un volumen pequeño hacen que haya flujos de plásticos que no se reciclan. Este capítulo hace referencia a aquellos plásticos que después de su uso suponen un flujo de gran volumen de residuos y que han sido regulados por ley. La Tabla 13.1 muestra la nomenclatura de los plásticos de uso industrial y la 13.2 la nomenclatura de los materiales compuestos.

Tabla 13.1. Nomenclatura inglesa de los polímeros de uso industrial. Fuente: IUPAC

PLÁSTICOS			
ABS	Acrilonitrilo-butadieno-estireno	DAIP	Ftalato de isodialilo
AMMA	Acrilotrilo-metracrilato de metilo	EC	Etil celulosa
ASA	Acrilonitrilo-estireno éster acrílico	EEA	Etileno/acrilato de etilo
CA	Acetato de celulosa	E/P	Etileno/propileno
CAB	Acetato-butirato de celulosa	EP	Epoxi
CAP	Acetato-propionato de celulosa	EPE	Ester epoxídico
CF	Cresol-formaldehido	EPS	Poliestireno expandido
CMC	Carboxi-metil-celulosa	EVA	Etileno-acetato de vinilo
CN	Nitrocelulosa	EVAL	Etileno-alcohol vinílico
CP	Propionato de celulosa	ETFE	Etileno-tetraflúor-etileno
CS	Caseína	FEP	Tetraflúoretileno/hexafluor-propileno
CTA	Triacetato de celulosa	HDPE	Polietileno de alta densidad
DAP	Ftalato de dialilo (dialilftalato)	LDPE	Polietileno de baja densidad

(Continúa)

Tabla 13.1. *(Continuación).*

PLÁSTICOS			
LLDPE	Polietileno lineal de baja densidad	PPO	Polióxido de fenileno
MDPE	Polietileno de media densidad	PPOX	Poli (óxido de polipropileno)
MBS	Metacrilato de metilo butadieno estireno	PPS	Polisulfuro de fenileno
MC	Metilcelulosa	PPSU	Poli (fenilén-sulfona)
MF	Melamina/formaldehído	PS	Poliestireno
MPF	Melamina/fenol formaldehído	PSGP	Poliestireno cristal
PA	Poliamida	PSHI	Poliestireno antichoque
PA 6	Polímero de 6-caprolactama	PSU	Polisulfona
PA 11	Polímero del ácido amino-11-undecanoico	PTFE	Politetrafluoretileno
PA 12	Polímero de dodecalonactama 1,12	PUR	Poliuretano
PA 66	Polímero de hexametilendiamina y del ácido adípico	PVAC	Poli (acetato de vinilo)
PA 610	Polímero de hexametilendiamina y del ácido sebácico	PVAL	Poli (alcohol vinílico)
PA 66/610	Copolímero de hexametilendiamina con ácido adípico y ácido sebácico	PVB	Poli (butirato de vinilo)
		PVC	Poli (cloruro de vinilo)
PA 6/12	Copolímero de PA 6 y PA 12	PVCC	Poli (cloruro de vinilo) clorado
PA 612	Polímero de hexametilendiamina y del ácido dodecanónico	PVDC	Poli (cloruro de vinilideno)
		PVDF	Poli (fluoruro de vinilideno)
PA6-3-T	Polímero de trimetil-hexametilendiamina y ácido tereftálico	PVF	Fluoruro de vinilideno
PAN	Poliacrilonitrilo	PVFM	Poli (vinil-formaldehído)
PB	Polibuteno-1	PVK	Polivinilcarbazol vinílico
PBTP	Poli-buetilen-teraftalato	PVP	Polivinil pirrolidona
PC	Policarbonato	RF	Resorcina-formaldehído
PCTFE	Policlorotrifluoretileno	SAN	Estireno acrilonitrilo
PDAP	Poli (ftalato de dialilo)	SB	Estireno butadieno
PE	Polietileno	SI	Siliconas
PEC	Polietileno clorado	SMS	Estireno-metilestireno
PEOX	Poli (óxido de etileno)	SP	Poliéster saturado
PEP	Polímero de etileno propileno	UF	Urea-formaldehído
PET	Poli (teraftalato de etilen)	UHMWPE	Polietileno de alto peso molecular
PETP	Poli (teraftalato de etilenglicol)	UP	Poliéster insaturado
PF	Fenol-formaldehído	VCE	Cloruro de vinilo/etileno
PI	Poliimida	VCEMA	Cloruro de vinilo/etileno/acrilato de metilo
PIB	Poli-isobutileno	VCEVA	Cloruro de vinilo/etileno/acetato de vinilo
PIR	Poli-isocianurato	VCMA	Cloruro de vinilo/acrilato de metilo
PIMI	Polimetracrilamida	VCMMA	Cloruro de vinilo/metacrilato de metilo
PMMA	Poli (metracrilato de metilo)	VCOA	Cloruro de vinilo/acrilato de octilo
PMP	Poli (metil-4 penteno-1)	VCVAC	Cloruro de vinilo/acetato de vinilo
POM	Polioximetileno poliformaldehído (poliacetal)	VCVDC	Cloruro de vinilo/cloruro de vinilideno
PP	Polipropileno	VPE	Polietileno reticulado
PPC	Polipropileno clorado		

Tabla 13.2. Nomenclatura inglesa de los materiales compuestos. Fuente: IUPAC

PLÁSTICOS REFORZADOS	
ARP	Plástico reforzado con fibra de vidrio
BRP	Plástico reforzado con fibra de amianto
CFRP	Plástico reforzado con fibra de boro
GRP	Plástico reforzado con fibra de carbono
MFRP	Plástico reforzado con fibra metálica
MWRP	Plástico reforzado con fibra whiskers
SFRP	Plástico reforzado con fibra sintética
Los termoplásticos reforzados acompañarán a sus abreviaturas las de fv, fa, fb, fs, y fw, según los casos. Ej.:PP-fv (Polipropileno con fibra de vidrio.	

Los plásticos reforzados son materiales de relativamente nueva aparición pero de gran consumo, que ha generado aplicaciones masivas por ejemplo en el sector de envase y embalaje. Esto supone un problema ambiental, ya que las posibles soluciones a los residuos de este tipo han surgido cuando el problema de las grandes cantidades de desechos de este tipo de materiales se ha hecho evidente y, por tanto, ya hay grandes volúmenes vertidos sin ningún reciclado o aprovechamiento previo.

1.2. CONSUMO ESTIMADO DE PLÁSTICOS

El consumo estimado de materiales por sectores se muestra en la Tabla 13.3.

En resumen, y en datos de 2002, el consumo de plásticos en España fue de 3,5 millones de toneladas y aproximadamente 84 kilos por habitante.

Por otra parte, tal y como acontece con otros bienes, la producción de plásticos, antes de su procesado y uso en aplicaciones de consumo, conlleva unas emisiones que suponen un notable impacto ambiental, tal como muestra la Tabla 13.4.

Para producir los materiales expuestos en la Tabla 13.4 se puede destacar que, en cuanto a emisiones al aire, el PET y el HDPE serian los mas contaminantes seguidos por el PP y el PVC. En cambio destaca el PVC como el más contaminante para el medio hídrico. El PP y el HDPE son los que tienen un menor impacto ambiental global asociado.

Tabla 13.3. Consumo de plásticos por sectores en 2003 (Fuente: APME)

Sector	Miles de toneladas en España (2002)	% del total en España	% en Europa 15 (total = 39,7 mill. T)
Envase y embalaje	1.586	45	37,2
Construcción	487	14	18.5
Automoción	337	10	8
Agricultura	230	6.5	1,9
Mobiliario	216	6	
Electrónica	164	5	8,5
Industrial	82	2,3	5,8
Electrodomésticos	90	2,6	20,1
Juguetes	73	2,1	
Otros	253	6,5	

Tabla 13.4. Emisiones a la atmósfera de la fabricación de plásticos

Emisión	HDPE 1 kg de tubo	PP 1 kg de granza	PVC 1 kg en masa	PET 1 kg de botellas
Partículas	7.100	1.500	1.700	5.000
CO	1.500	720	660	6.000
CO_2	3 millones	1,9 millones	1,2 millones	3,1 millones
SO_x	24.000	13.000	5.700	23.000
NO_x	15.000	9.600	6.400	16.000
Hidrocarburos	6.200	2.300	1.400	12.000
Metano	8.300	6.100	4.300	10.000
Hidrogeno	100	77	410	460
HCL	230	33	70	—
Organoclorados	—	—	10	—

2. Tipos y características de plásticos

Las propiedades químicas más relevantes de los polímeros son:

- *Resistencia al ataque químico:* depende de la naturaleza de los grupos funcionales característicos de cada monómero y en parte también de su estructura. Esto explica la diversidad de comportamiento ante agentes químicos de los diferentes materiales. Así, las poliolefinas, que solo tienen enlaces C-C y C-H, son resistentes a ácidos, bases y muchos disolventes, lo que permite su uso para envasado de productos químicos o alimentos.
- *Solubilidad:* los polímeros termoestables son insolubles en disolvente puesto que este no puede separar las cadenas entrecruzadas, tan solo se produce un hinchamiento. Los polímeros de ca-

dena lineal presentan respuestas más variadas a los disolventes, en función de la temperatura, el disolvente en cuestión y los grupos funcionales.

- *Resistencia al envejecimiento:* generalmente son susceptibles de oxidación tanto térmica como fotoquímica, especialmente por el efecto combinado de calor, luz solar y oxígeno en condiciones atmosféricas. La degradación se produce por la formación de radicales libres que facilitan la posterior oxidación y las reacciones en cadena. Los polímeros cristalinos, por su mayor ordenación molecular, son más resistentes que los amorfos. Los estabilizantes reducen la vulnerabilidad a la foto oxidación, especialmente en aquellos polímeros mas débiles como el PVC y el PP.
- *Estabilidad térmica:* la gran variedad de polímeros implica que unos, como el PTFE (politetrafluoretileno), PUR, PA o epoxi, puedan usarse a más de 100-300 ℃, y otros, como el PVC y el PS, solo puedan usarse por debajo de los 70 ℃. El calor provoca cambios químicos diversos, despolimerizacion, reacciones de eliminación (pérdida de cloro en el PVC), fragmentación y reacciones de los grupos funcionales. Esto afecta a las uniones más débiles presentes en la mayoría de los polímeros y que hacen disminuir su resistencia térmica. Para contrarrestarlo se utiliza la técnica de estabilización por resonancia y se refuerza la unión y entrecruzamiento de las cadenas mediante, por ejemplo, puentes de hidrógeno o grupos polares.
- *Permeabilidad:* la permeabilidad a los gases es de vital importancia en el sector del envase y embalaje. Por otra parte, la permeabilidad selectiva es la base de la tecnología de membranas. Los polímeros polares tienden a ser buenas barreras frente al O_2, CO_2 o N_2 y ofrecen pocas cualidades ante el vapor de agua. Las poliolefinas, apolares, actúan exactamente a la inversa. La cristalinidad, empaquetamiento molecular, la orientación o la afinidad entre carga y polímero también influyen.
- *Adherencia:* de gran relevancia en el sector de fabricación de adhesivos.
- *Propiedades mecánicas:* la densidad, resistencia al impacto, a la traccion, la tenacidad, transparencia o la rigidez, vienen determinadas también por los factores antes expuestos.
- *Propiedades ópticas:* las principales son la transmisión de la luz, índice de refracción o número de Abbe, que influyen en la transparencia, brillo o turbidez. Los polímeros amorfos como PS o PC cuando no tienen cargas ni impurezas ofrecen la mayor transparencia. La presencia de estructuras cristalinas pueden interferir con el paso de la luz provocando turbidez a menos que sean de tamaño inferior a la longitud de onda de la luz incidente, como las esferulitas. Esto se puede conseguir también mediante la adición de agentes nucleantes. Esto explica las aplicaciones en óptica de lentes de policarbonato, las fibras ópticas de polimetacrilato de metilo o los filtros ópticos.
- *Propiedades eléctricas:* actualmente en fase de investigación por su gran potencial en aplicaciones de alto valor añadido como circuitos electrónicos, sistemas de almacenamiento de datos, sensores y detectores, componentes eléctricos. Hay materiales piezo, piro y triboeléctricos, fotoconductores, conductores (conductividad superior a 10^2S/cm) semiconductores (10^{-7}-10^2S/cm) y aislantes (10^{-19}-10^{-7} S/cm). Actualmente las propiedades mecánicas y de procesado no son óptimas todavía.

2.1. TERMOPLÁSTICOS

Los termoplásticos son polímeros generalmente lineales o poco ramificados, por lo que pueden fluir a presión por encima de su punto de fusión. Pueden ser moldeados y remoldeados mediante calor una y otra vez, por lo que su reciclado es relativamente sencillo y les convierte en los materiales objeto de reciclaje habitualmente. De hecho, al hablar de reciclaje mecánico se hace referencia casi exclusivamente a este tipo de plásticos. Suponen un 80% de los plásticos producidos actualmente y se encuentran en los siguientes productos:

- HDPE: tuberías, contenedores diversos, botellas, juguetes.
- LDPE: bolsas de plástico, film, contenedores flexibles.
- PET: básicamente botellas y envase de alimentación, moquetas.
- PP: cajas de fruta-botellas, piezas de automoción y fibras resistentes.
- PS: envases de yogures, cubertería desechable, cintas de cassette/cajas de CD, perchas, también expandido como vajilla desechable, aislante y para embalaje, sobre todo protector.
- PVC: carpintería de PVC, suelos, botellas, film, aislante de cables, tarjetas de crédito y productos médicos.

2.2. TERMOESTABLES

Los polímeros termoestables sufren una transformación química al ser sometidos a calor y sus moléculas crean una red tridimensional. Son materiales que una vez han solidificado no pueden ser moldeados o fundidos de nuevo porque pierden sus características, por lo que son de difícil reciclado. Principalmente se valorizan triturándolos e incluyéndolos como carga en otros procesos. Suponen el 20% de los plásticos producidos y se pueden encontrar típicamente en:

- *PUR* (resina de poliuretano): pinturas, acabados, relleno de cojines, colchones y asientos de coche.
- *EPOXY* (resinas epoxy): adhesivos, equipamiento deportivo, componentes eléctricos y de automoción.
- *RESINAS FENÓLICAS:* elementos que deben resistir el calor, como elementos de cocina (asas, mangos, soportes, maquinaria), placas para circuitos eléctricos o componentes para automoción.

Las dos familias de plásticos, termoplásticos y termoestables, requieren maquinaria de trituración, densificación, lavado y procesado muy diferente, lo que conlleva la especialización de las empresas dedicadas al reciclado.

2.3. MATERIALES COMPUESTOS

Desde un punto de vista ortodoxo los plásticos en sí mismos deberían considerarse materiales compuestos, ya que están formados por un polímero de naturaleza orgánica y unos aditivos, orgánicos e inorgánicos, como estabilizantes, cargas, etc. Para facilitar la comprensión se consideran los diferentes tipos de plásticos como materiales homogéneos entre sí, aunque en realidad de, por ejemplo, polipropileno, se encuentren multitud de calidades y composiciones específicas según su uso.

Los materiales compuestos o composites se basan en la miscibilidad de especies poliméricas diferentes que, sin mezclarse totalmente coexisten en diferentes grados según los polímeros aportando las propiedades de cada uno de los polímeros del composite. Un ejemplo son los materiales reforzados con fibras, como la matriz de metaacrilato reforzada con fibra de vidrio. Para facilitar la compatibilidad entre polímeros se añaden aditivos que reducen la tensión interfacial y estabilizan y aumentan los entrelazamientos entre ellos. Hay materiales multifase en los que fibras resistentes y alineadas permanecen dentro de la matriz polimérica confiriéndole mejores propiedades mecánicas.

Los materiales reforzados se consideran no reciclables, aunque algunas investigaciones a escala no comercial apuntan a la posibilidad de una valorización mediante reciclado químico. La pirólisis a baja temperatura (500 ℃) es un proceso capaz de eliminar el polímero para convertirlo en aceite y gas de síntesis y conservar relativamente las propiedades de la fibra de vidrio en cuanto a tamaño y resistencia debido a que no se ven afectadas por la temperatura. Estas fibras recicladas se podrían añadir hasta en un 25% para la fabricación de nuevo de plásticos compuestos con idénticas propiedades.

2.4. ADITIVOS PLÁSTICOS

Los aditivos plásticos son necesarios para mantener en el tiempo las características mecánicas, físicas y térmicas de los polímeros. Son clave para obtener el comportamiento deseado para cada aplicación especifica. Se pueden distinguir:

- *Estabilizantes:* evitan o retrasan la degradación producida por el calor, la luz ultravioleta, el agua o el tiempo. Especialmente relevante en el caso del PVC que se degrada por autooxidación y deshidrocloración. Algunos metales pesados, como el cadmio, están clasificados como disruptores endocrinos y han sido ampliamente utilizados como estabilizantes. Actualmente la tendencia es sustituirlos por otros menos nocivos, como la mezcla de calcio y zinc. Estos estabilizantes alternativos están actualmente en fase de desarrollo e investigación, pero no pueden sustituir a los aditivos convencionales en todas las aplicaciones por motivos del comportamiento requerido.
- Las sales de plomo usadas como estabilizantes en el PVC están siendo sustituidas por la mezcla comentada o por estaño y estabilizantes orgánicos, en virtud del compromiso voluntario de la industria del PVC firmado en el año 2000 que marca como objetivo para el 2015 la eliminación total del uso de estas sales. Esta sustitución es bastante significativa puesto que no está científicamente demostrado que las sales de plomo representen un riesgo para la salud salvo para los operarios en contacto directo con ellas, puesto que están insertadas en la matriz polimérica y no deberían liberarse al ambiente ni siquiera con la degradación de los productos fabricados con PVC. En este caso se aplica el principio de precaución y la actitud ambientalmente correcta de este sector de los plásticos, que ha visto merma-

da su imagen ante los consumidores. Sin embargo, hay otros investigadores que han demostrado que por la fotodegradación y el tiempo el plomo pasa al contenido de los envases y si este es agua, por ejemplo, puede alcanzar a los usuarios.

- *Aditivos para la resistencia al impacto:* especialmente para plásticos rígidos como el PC o el PBT ampliamente usados en el sector de la automoción y los productos de oficina.
- *Retardantes de llama:* necesarios para las aplicaciones sometidas a temperaturas relativamente elevadas, como la electrónica, la construcción o el automóvil. El PVC ya tiene estas características debido a la presencia de cloro en su composición. Específicamente los retardantes de llama bromados son los más nocivos, por lo que la normativa de RAEE (Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos) obliga a la separación de estos materiales para evitar que sean incinerados con el flujo normal de residuos y que ven condicionado su uso por la directiva RoHS (*Reduction of Hazard Substances*, en sus siglas inglesas, reducción de sustancias peligrosas en la fabricación de equipos eléctricos y electrónicos). También hay que añadir que en la incineración convencional los halógenos continúan en la corriente de gases y para prevenir su emisión es preciso neutralizar los gases ácidos, que técnicamente no tiene dificultad si se conoce de antemano el problema. Los avances tecnológicos permitirán ir sustituyéndolos por otros con menor impacto. El aspecto positivo de estos retardantes bromados es que mediante reciclado mecánico no superan los límites impuestos de formación de dioxinas y furanos del referente normativo alemán y que conservan sus propiedades de retardante de llama a pesar del proceso de reciclado. Las alternativas que actualmente tienen mayores perspectivas son los aditivos a base de fosfatos, como el polifosfato de amonio, que ha demostrado conservar las propiedades del plástico en varios ciclos de reciclado de PP y espumas de PUR.
- *Cargas:* materias inertes como el talco o el carbonato cálcico que añaden rigidez y opacidad.
- *Antiestáticos:* se mezclan con el polímero o se aplican a la superficie. Evitan la aparición de electricidad estática causada generalmente por efecto triboeléctrico haciendo el material ligeramente conductor por sí mismo o bien absorbiendo un poco de humedad del ambiente.
- *Plastificantes:* se mezclan con el polímero de base aportándole flexibilidad. Los ftalatos son los más utilizados en el PVC.
- *Agentes de compatibilizacion:* permiten la mezcla de materias plásticas de diferente naturaleza química.
- *Otros:* sustancias especificas para mejorar el comportamiento técnico de los plásticos durante su procesado (lubricantes para el desmoldeo) o uso posterior (lubricantes para separar las bolsas de film enrolladas y prensadas).

El papel de los aditivos es muy significativo, puesto que sin ellos muchas aplicaciones actuales no serían posibles. En términos ambientales pueden jugar un doble papel, por un lado dificultan el reciclado de los plásticos y por otro les alargan la vida útil y disminuyen los espesores necesarios para aportar la resistencia requerida. Por otro lado, en muchos casos la utilización de plástico reciclado es posible gracias a los aditivos, que acaban de conferir al material las características que necesita el producto final. Esto es en parte debido a que los procesos intensivos de trituración, lavado y secado que implica el reciclado eliminan parte de los aditivos, trasladando el problema a las aguas.

3. Características de los plásticos en orden a su reciclado

Generalmente el reciclado de plásticos hace referencia al reciclado mecánico, es decir, al uso de los residuos plásticos troceados y más o menos limpios para su uso en la fabricación de productos plásticos. Esto implica un nuevo ciclo de extrusión, bien para obtener granza reciclada o como paso previo al moldeo del producto. También se puede reciclar químicamente, que sería la descomposición del polímero en los monómeros que lo componen, generalmente mediante procesos de craqueo térmico. Esta opción es mucho más costosa y está en fase de desarrollo. Por último, se puede recuperar la energía contenida en los plásticos mediante valorización energética.

Hay más de cien familias de plásticos y generalmente no son compatibles para su procesado conjunto, puesto que sus características son muy variables, especialmente teniendo en cuenta la gran diversidad de aditivos que incluyen. De esta manera,

pequeñas cantidades de un plástico incompatible en una masa de residuos a reciclar puede disminuir en gran medida la calidad de la granza reciclada resultante.

El origen de los plásticos es petroquímico, a pesar que los primeros polímeros usados, el celofán o la seda, fueran de procedencia natural. Su origen los convierte en materiales no renovables, de ahí la cultura del reciclaje que se ha desarrollado en los países industrializados para evitar el derroche de materias primas por un lado y la contaminación que producen los residuos de fabricación y productos desechados por otro. Además, los materiales plásticos son no biodegradables, o su ritmo de degradación es extremadamente lento, de más de 50 años en condiciones de vertedero (algunos autores elevan la cifra hasta 200 años).

La Tabla 13.5 muestra los códigos de reciclado universalmente aceptados y reúne las principales características y usos de los materiales que se reciclan.

Tabla 13.5. Código y características de los plásticos para el reciclado

Código de reciclado	Propiedades	Aplicaciones del envasado	Aplicaciones para el reciclado
	Polietileno tereftalato (PET, PETE), también referido genéricamente como poliéster. Transparencia, buenas propiedades como barrera al gas y la humedad, dureza y resistencia al calor. Se hunde en el agua, por lo que se separa del PE porque este último flota.	Botellas de refrescos y especialmente agua, así como otros envases de productos perecederos como mantequilla, salsas, comida precocinada para horno.	Sobre todo en la elaboración de textiles y textiles no tejidos (fieltros y forro polar), moquetas, fibras de relleno para almohadas y acolchados diversos, cintas de audio/video, geotextiles.
	Polietileno de alta densidad PEAD (HDPE, high density poliethylene). HDPE Rigidez, resitencia al ataque químico y a la humedad, permeabilidad al gas, facilidad de procesado. El PEAD pigmentado tiene mayor resistencia a la fractura que el no pigmentado.	Botellas de leche, zumo, cosméticos, detergentes, bolsas de envase.	Botellas de detergentes, aceite para automoción, tuberías, macetas, cubos, perfiles y sustituto de madera: bancos, suelos, vallas, etc.
	Cloruro de polivinilo (PVC). Excelente resistencia al ataque químico, a la exposición solar y la intemperie, al calor, buen aislante y gran resistencia mecánica. Transparencia y facilidad de mezclado con otros componentes Lo hay flexible y rígido en función de las aplicaciones a que se destina.	El rígido se usa en botellas y todo tipo de envase transparente, tuberías, carpintería para construcción y reversos de moquetas. El flexible se usa en blisters, film (bolsas de sangre y accesorios de oficina) tubos de aplicación en medicina, recubrimiento de cables, pavimentos sintéticos, piel sintética, pinturas y recubrimientos. En general, aplicaciones que requieren de buenas propiedades aislantes y resistencia al calor.	Alfombrillas, tuberías, panelado (estanterías de poca calidad de diseño), pavimentos, cajas eléctricas, conos y elementos viarios.
	PEBD, Polietileno de baja densidad (LDPE, Low Density Polyethylene, en inglés). Químicamente similar al HDPE pero menos denso y más flexible, lo que determina sus aplicaciones. Resistencia, transparencia media, flexibilidad, barrera a la humedad, facilidad de procesado y sellado.	Tapas flexibles para envase, botellas flexibles (miel, mostaza), film para todo tipo de bolsas (comida, fundas de ropa, bolsas de envío postal).	Envoltorios para transporte (menor calidad de diseño), cubos, macetas, perfiles y sustituto de madera.
	PP, Polipropileno (PP, Polypropylene). Buena resistencia química, alto punto de fusión y por tanto resistencia al calor, dureza y resistencia, barrera a la humedad.	En aplicaciones tanto flexibles como rígidas que se requiera resistencia al calor, como componentes para automoción, contenedores de líquidos calientes. También en fibras, botellas de productos variados.	Carcasas de baterías de vehículos, luces de señalización, fibras de escobas y cepillos, rejillas y rastrillos o herramientas y piezas de fricción, bandejas, palets.
	PS, poliestireno (PS, Polystyrene). Puede ser rígido o expandido (EPS). Gran transparencia, propiedades aislantes y facilidad de procesado. Versátil, con punto de fusión relativamente bajo y frágil.	Expandido: envase de protección, bandejas y vasos desechables, aislante en construcción. Rígido: cajas, tapas y contenedores, como cajas de CD, vajilla y cubertería desechable, envases de yogur, huevos.	Interruptores eléctricos, aislante térmico, material de oficina rígido, perchas de ropa. El expandido se usa como aislante en construcción y embalaje de protección en aplicaciones de menor calidad de diseño.
	Utilizado para materiales distintos a los anteriores o para mezclas complejas o composites en los que los materiales anteriores no son claramente predominantes.	Todo tipo de aplicaciones.	Aplicaciones en los que no se requiera pureza del material reciclado, como perfiles sustitutos de madera. Los materiales reforzados con fibras no se reciclan.

Tabla 13.6. Aplicaciones de destino de los plásticos reciclados. (Fuente APME)

Doméstico (20%)		Distribución (40%)		Construcción (30%)		Otros (10%)	
Fibras de relleno	47%	Bolsas y film	74%	Cables	8%	Botellas	20%
Mobiliario	22%	Flejes	2%	Ventanas	5%	Componentes automoción	25%
Cubos	4%	Cajas	10%	Tuberías	40%	Agricultura	16%
Contenedores	18%	Palets	14%	Varios	47%	Mobiliario urbano	27%
Otros	10%					Varios	12%

El uso de los plásticos reciclados en Europa (15 países) se distribuye por sectores y aplicaciones como muestra la Tabla 13.6.

La Figura 13.1. muestra el porcentaje de recuperación (reciclado o valorización energética) que representa cada tipo de plástico en España.

En los apartados siguientes se procede a un análisis más pormenorizado de las posibilidades de valorización de los principales plásticos.

3.1. POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD (PEAD O HDPE)

Es de sencillo reciclado, se tritura en copos, se lavan y flotan para eliminar los contaminantes pesados que pudiera contener el material, finalmente se secan en corriente de aire caliente y se usan directamente. Los copos también se pueden extruir para hacer granza, granulado o perlas.

Modificando aspectos morfológicos del polietileno se consiguen diferentes densidades, grados de cristalinidad, puntos de fusión y, por lo tanto, de propiedades térmicas y mecánicas. Se puede inducir mediante calor y presión la formación de enlaces covalentes entre las cadenas poliméricas para modificar las propiedades de los termoplásticos. El polietileno entrecruzado, por ejemplo, es mucho más estable dimensionalmente a altas temperaturas (se vuelve más elástico), por lo que se utiliza sobre todo como material celular de aislamiento en conductos de agua caliente, aislamiento de cables de alta tensión y acústicos. Se ha conseguido también polietilenos modificados de características similares al acero o la fibra de carbono.

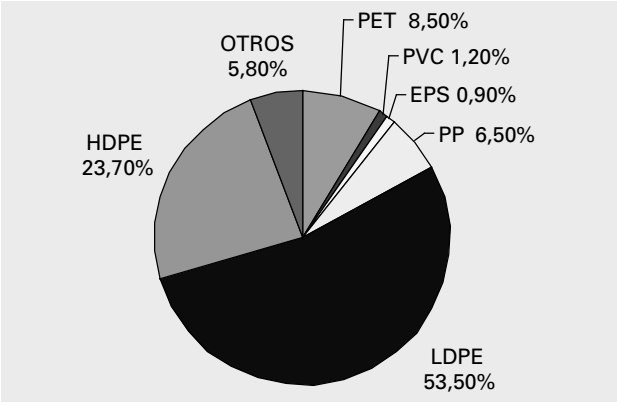


Figura 13.1. Reciclado de los diferentes polímeros en España.

El polietileno de alta densidad es el material utilizado en gran parte de la industria del envase, exceptuando el agua y refrescos. Se encuentra HDPE en envases de detergentes, productos cosméticos, aceites lubricantes. Para las aplicaciones en las que normalmente el color y la calidad del acabado superficial son importantes, se utiliza la técnica de coextrusión en tres capas para utilizar material reciclado en la intermedia. La legislación Española, no así en el resto de Europa, impide el uso de plástico reciclado para la elaboración de envases en contacto directo con alimentos para consumo humano. Para poder utilizar plástico reciclado en esta aplicación se emplea la técnica de coextrusión, en la que el plástico reciclado se coloca en la parte central, como si se tratara de un *sandwich*, y las caras exteriores son de material virgen. La granza reciclada tiene como destino principal la fabricación de tapones, tuberías de riego, macetas y acolchados plásticos para agricultura, evitando las aplicaciones en contacto directo con la comida y aquellas en las que el espesor no se puede aumentar para compensar la pérdida de propiedades mecánicas.

Las poliolefinas son menos densas que el agua, mientras que el resto de polímeros sedimentan, por lo que se utiliza ampliamente la técnica de las balsas de flotación para la separación de estos materiales.

3.2. POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (PEBD O LDPE)

Su uso más extendido es la fabricación de film retráctil, de gran uso en el embalaje para distribución y transporte de todo tipo de productos, especialmente

envolviendo los palets. El reciclado de film tiene la dificultad de que el material es muy flexible y plástico y da problemas al ser triturado. Las cuchillas deben ser muy afiladas y en forma de cizalla para que no se enrede y atasque el triturador. El esquema de reciclado de film suele ser el siguiente:

- Almacenamiento de las balas compactadas.
- Trituración previa de las balas.
- Separación magnética de metales férricos y por corrientes de Focault de no férricos.
- Prelavado y eliminación por densidad de otros materiales pesados, como tierra, flejes o metales.
- Trituración en molino de lavado.
- Eliminación del papel de las etiquetas por lavado de fricción y recogida y tratamiento del agua para su recirculación.
- Separación por densidades del film mediante flotación, hidrociclón o centrifuga. Simultáneamente se puede tratar con agua caliente y/o disolventes para eliminar adhesivos.
- Secado mecánico, para evitar que un aumento de temperatura en el secado térmico afecte a las características del material.
- El recorte ya limpio y seco puede ser utilizado directamente o bien se puede extruir para hacer granza, obteniendo así un material más homogéneo, ya que se puede filtrar a la salida de la extrusora, cuando está fundido.

Los posibles destinos pueden ser tuberías, laminados para edificación, pavimentos, aislantes de cables, contenedores varios de uso domestico o industrial. El caso particular del film de agricultura se trata en el apartado 4.5.

3.3. POLIETILENO TEREFTALATO (PET)

El PET es un polímero termoplástico producido por polimerización de etilenglicol con ácido tereftálico. Su uso masivo en el sector del envase se inició en la década de los 90 del pasado siglo debido a las facilidades que ofrecía para el envasado y embalaje por la variedad de formas y colores en que se podía procesar y las ventajas de su bajo peso.

En España se estima en aproximadamente el 17% (1,4 millones de t) los residuos de envase de PET respecto el total de residuos plásticos. Este material ha experimentado un gran crecimiento en el uso para embotellado de bebidas carbonatadas y agua.

Actualmente la mayoría del PET se recicla mecánicamente, con los inconvenientes propios de un material con impurezas como las botellas, que llevan adheridas pegatinas y pinturas. Para que el PET reciclado pueda ser utilizado de nuevo en aplicaciones en contacto directo con alimentos se utiliza la técnica de coextrusión, donde se sitúa una capa de PET reciclado entre dos capas de PET virgen. Este tipo de envase debe someterse a pruebas para asegurar que no se producen migraciones del reciclado hacia el alimento.

Al ser un polímero de adición, el PET es relativamente sencillo de despolimerizar, para lo que se están estudiando alternativas de reciclado químico como:

- *Metanolisis:* es la despolimerización del PET al reaccionar con metanol a presión y temperatura para obtener tereftalato de dimetilo (DMT) y etilenglicol (EG). El DMT y el EG se pueden purificar para la obtención de PET de nuevo u otras aplicaciones.
- *Glicólisis:* despolimerización por reacción con EG para reducir la larga cadena polimérica a oligómeros.
- *Hidrólisis:* despolimerización a ácido tereftálico y EG, que pueden usarse de nuevo para la producción de PET tras ser depurados. Se puede realizar mediante ácidos o bases.

Uno de los procesos de reciclado que se lleva a cabo en Alemania consiste en dos fases, una de reciclado mecánico y otra de reciclado químico. En la primera se selecciona manualmente el material, en caso de mezclas de envases de contenedor amarillo (color del contenedor donde habitualmente se depositan los envases domésticos en la recogida selectiva) y se separa automáticamente la fracción metálica. El reciclado de botellas de PET de un solo uso comenzaría con la trituración de las botellas en escamas que serán lavadas con agua caliente para eliminar las etiquetas y la suciedad. Por flotación se separan las escamas de otros materiales, especialmente las polioloefinas de los tapones y el PVC que pudiera haber presente por decantación. Luego se secan y se separan los colores.

El reciclado químico consiste en tratar con sosa cáustica la escama de PET e introducirlas en un horno rotatorio para que la superficie con impurezas de la escama se elimine. Finalmente se lava, seca y separa de impurezas quedando una escama de alta calidad que se puede incorporar incluso hasta un 80% en la fabricación de nuevas botellas y envases de alimentación, ya que cumple con las normas de seguridad de

la USFDA (Food and Drug Administration, EE. UU). Esta escama puede someterse también a extrusion para obtener granulado y tanto la escama como el granulado se pueden utilizar directamente en la inyección de preformas. Cabe resaltar que actualmente se consumen 120 billones de botellas de PET anualmente, que por ley no son aptas para su reutilización.

Teniendo en cuenta la eficiencia del 85-95% en la separación efectiva de las botellas de PET en las plantas de selección y el 86-90% de eficiencia en el reciclado mecánico de las botellas a escama de PET, la eficiencia global seria del 73-86%, es decir, bastante elevada.

Los usos más habituales a los que se destina la granza reciclada mecánicamente de PET son los mostrados en la Figura 13.2.

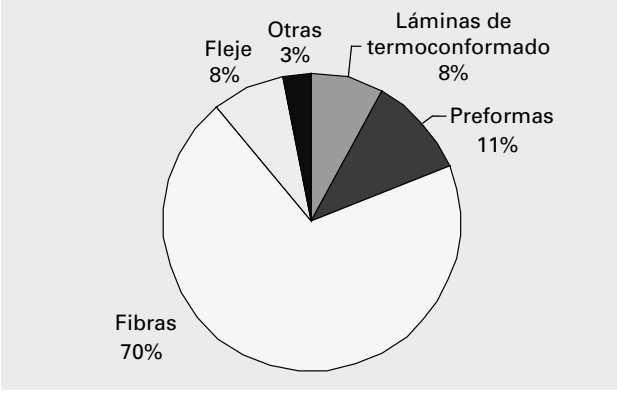


Figura 13.2. Usos de la granza reciclada de PET.

Las fibras tienen un gran aplicación para rellenos, como ropa de abrigo y sacos de dormir, textiles no tejidos (fieltros, forro polar) y tejidos de punto sustitutivos de la lana.

En el DVD adjunto, en el punto 1, se suministra información complementaria sobre el reciclado de PET.

3.4. PVC

El PVC tiene una gran resistencia mecánica y al ataque del agua y los productos químicos, lo que lo hace idóneo para aplicaciones que deban permanecer indeformables y durar en el tiempo, como las tarjetas de crédito o perfiles de ventanas en construcción. Es, sin embargo, poco estable ante el calor (aunque no fácilmente inflamable) y la radiación ultravioleta de la luz, por lo que necesita aditivos que solventen estas debilidades. En la década de los noventa se levantaron voces críticas contra este material debido al impacto sobre la salud de las emisiones inherentes al proceso de producción y a la interacción de los productos acabados y los residuos con el ambiente, que hace que libere ciertas sustancias tóxicas. La industria del PVC empezó a hacer esfuerzos para conseguir reciclarlo de manera óptima y demostrar a la sociedad que la producción y uso son seguros para el medio ambiente y la salud de las personas. Muchos productos fabricados anteriormente con PVC, como las botellas de agua, son ahora fabricados con otros polímeros, pero su mercado es todavía ingente ya se han desarrollado variedades de PVC (orientado, flexible, clorado, rígido) que ofrecen características insustituibles en aplicaciones técnicas de alto valor añadido. Es el tercer polímero en cuota de mercado, con una producción anual, en España, de 396.700 t.

El 80% de la producción se realiza por suspensión. A partir de cloruro de vinilo (obtenido en planta a partir de etileno y cloro gas) con agua y dispersante, un agente inicia la reacción de polimerización del cloruro de vinilo y se van formando partículas de PVC que se recogen por centrifugación. Las posibles emisiones pueden ser de cloro, etileno, cloruro de vinilo y otros clorados, como HCl o dioxinas, todas ellas tóxicas. Para evitarlo, actualmente los procesos se llevan a cabo en instalaciones cerradas que minimizan el riesgo de emisiones.

Para elaborar los productos plásticos, al polvo de PVC se le añaden los aditivos necesarios (en circuito cerrado) para obtener las características deseadas y se somete a ciclos de calentamiento y enfriamiento, que están sujetos a riesgo de emisiones, mediante todas las técnicas del mercado: soplado, extrusión, calandrado, inyección, rotación y todas sus combinaciones. El mayor peligro es que el PVC libere HCl al ser calentado en exceso. Todos estos riesgos se circunscriben al entorno productivo, que debe seguir sus regulaciones correspondientes en materia de seguridad para los trabajadores. De esta manera, no se puede afirmar que la producción de PVC y la fabricación de productos representen un riesgo para el medio ambiente mayor que muchos otros procesos de producción.

Mayor consideración merece el comportamiento del material a lo largo de la vida útil del producto con él fabricado, especialmente debido a los plastificantes y estabilizantes usados. Estos aditivos de bajo peso molecular no se mantienen presos en la matriz polimérica y tienden a migrar al exterior, contaminando por una parte y acelerando la degradación del PVC y, por tanto, acortando la vida útil del producto por otra.

Los plastificantes son especialmente significativos en la producción de PVC flexible, que supone el 50% de la producción total, la cual consume anualmente en Europa 900.000 t de ftalatos y adipatos (ésteres de ácidos orgánicos) para añadir hasta en un 50% en peso del producto de PVC. Los ftalatos de cadena larga son poco biodegradables y sólo se pueden tratar mediante el proceso de depuración de lixiviados. Generalmente las EDAR pueden degradar los ftalatos y, aunque no se ha detectado que sean bioacumulables, los mismos compuestos y sus productos de degradación pueden afectar a los tejidos blandos y algunos son disruptores endocrinos. Esto hace que las aplicaciones en contacto directo con disoluciones fisiológicas, como catéteres, bolsas de sangre o juguetes (los niños los chupan) presenten un riesgo a evitar utilizando otros plastificantes, aunque aún no hay alternativas claras.

Los estabilizantes más utilizados para dotar al PVC de mayor resistencia frente al calor y la luz UV son sales de plomo, de las que se usaron en Europa, en 1998, 112.000 t, sobre todo para la fabricación de tuberías, perfiles y cables. También el cadmio tiene una presencia notable, ya que se calcula que los residuos de PVC que lo contienen aportan el 10% de todo el cadmio que se detecta en incineradoras y vertederos urbanos. Los sustitutos en este caso están más desarrollados, siendo los compuestos de calcio y zinc, bario y zinc y los organoestánnicos los más utilizados.

Se estima que la generación de residuos fue en 1999 de 3,6 millones de t de PVC postconsumo y 0,5 millones de t de industrial en Europa. El reciclado mecánico de PVC exige la trituración, lavado y eliminación de impurezas, por lo que el grado de limpieza del material residual delimita la rentabilidad del proceso, que se restringe prácticamente a los residuos industriales, recortes, piezas defectuosas, etc. En el caso de materiales postconsumo la reciclabilidad es función de la rentabilidad económica y siempre tiene como impedimento el bajo coste de otras rutas de gestión, como el vertido.

El mercado del PVC reciclado mecánicamente es el de las tuberías, conductos de electricidad y forrado de cables, suelas y otro material no visible para calzado, pavimentos sencillos. El 33% se dedica al sector de las tuberías y el 26% a las piezas industriales, quedando el resto repartido entre las otras opciones.

Cerca de 600.000 t de PVC acaban anualmente incinerándose en Europa, ya que no son correctamente separadas y siguen el flujo de los residuos municipales. Se calcula que el 10% del total de plásticos incinerados es PVC y que éste aporta el 38-66% del cloro eliminado de las emisiones de la incineración (el resto procede de los restos orgánicos y el papel). Por un lado incrementan el PCI de la masa incinerada y por otro aumentan los costes de operación por el esfuerzo para tratar los gases ácidos. Respecto a la formación de dioxinas y a pesar de representar el mayor aporte de cloro, tras un intenso debate científico no se ha podido establecer una relación directa entre el contenido de cloro y la formación de dioxinas, puesto que éstas se destruyen al 99,99% en el proceso de incineración y las emitidas son las que se han reformado al enfriarse los gases.

La industria del PVC ha desarrollado un proceso de reciclado mecánico, Vinyloop®, basado en la disolución del PVC de los residuos plásticos que lo contienen y una posterior precipitación y filtrado. Este proceso permite obtener un PVC equivalente al virgen y por lo tanto puede ser reutilizado en aplicaciones de alto valor añadido.

El esquema del proceso de reciclado de PVC se muestra en la Figura 13.3.

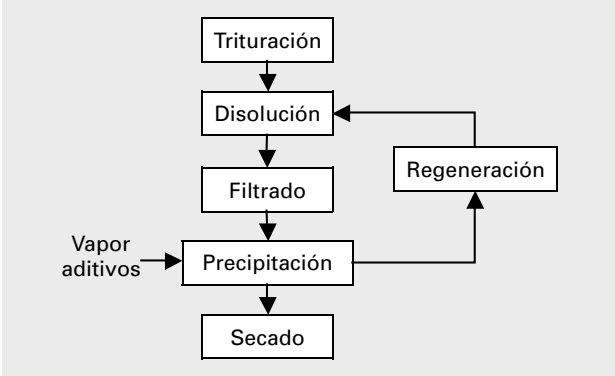


Figura 13.3. Proceso Vinyloop de reciclado de PVC.

El pretratamiento para la introducción al proceso de reciclado consta principalmente de:

- *Trituración, lavado y homogeneización:* en función de las características del material a tratar. La trituración es básica para poder facilitar la disolución.
- *Disolución y filtrado:* se utiliza un disolvente selectivo para disolver sólo el PVC y no los materiales secundarios, en ausencia de aire y en proceso cerrado. La eliminación de los materiales no disueltos se realiza por decantación, centrifugación o en ciclones en función de las características de los materiales a eliminar. Una vez separado, este material residual vuelve a

ser lavado con disolvente para eliminar y recuperar los restos de PVC que pudiera tener y éste se elimina por *stripping* con vapor y se incorpora al proceso de precipitación del PVC.

- *Precipitación:* se añaden los aditivos necesarios para la precipitación, aportando los aditivos y plastificantes necesarios para ajustar las características del PVC resultante a las aplicaciones específicas. En ese proceso se recuperan también los otros componentes de la formulación del PVC residual que entra al proceso. Se elimina el disolvente mediante *stripping* con vapor y se recupera por condensación en circuito cerrado con una tasa del 99,9%. La colada acuosa restante contiene las partículas precipitadas de PVC regenerado, que se separan y secan. El agua de proceso se depura antes de ser vertida.

En el DVD adjunto, en el punto 2, se puede hallar información suplementaria sobre el reciclado del PVC.

3.5. POLIESTIRENO (PS)

Los polímeros estirénicos hacen referencia a la familia de productos que utilizan el estireno como componente principal. Los principales polímeros son:

- PS – (Polystyrene). Poliestireno.
- EPS – (Expanded Polystyrene). Poliestireno expandido.
- ABS – (Acrylonitrile Butadiene Styrene Copolymer). Resina acrilonitrilo-butadieno-estireno.
- SAN – (Styrene Acrylonitrile Copolymer).
- UP-Unsaturated Polyester Resins.
- SBR-Styrene Butadiene Rubber.

Se distingue principalmente entre poliestireno cristal (GPPS, *general purpose* PS, en inglés) y poliestireno de alto impacto (HIPS, *high impact polystryrene*, en sus siglas inglesas), que está modificado con caucho. Es ligero, aislante eléctrico y térmico, tiene buenas propiedades de barrera a los gases para proteger alimentos, gran transparencia y brillo.

El consumo mundial de PS se estima en 12 millones de t y Europa consume alrededor del 26% del total.

— *PS cristal y HIPS*

Usado en todo tipo de envase (GPPS) y electrónica de consumo (HIPS), cuando se modifica con caucho mejora sus propiedades de resistencia al impacto, durabilidad y procesabilidad y se denomina HIPS.

La Figura 13.4 muestra los usos del poliestireno cristal y de alto impacto.

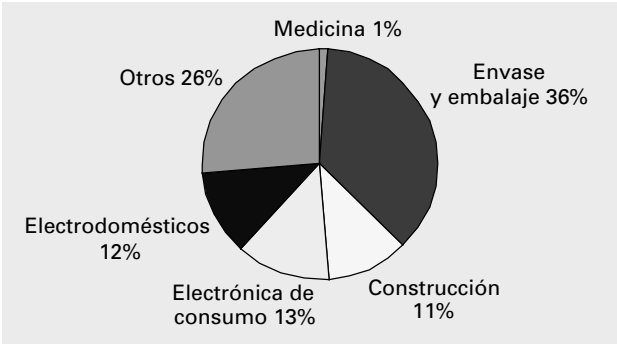


Figura 13.4. Usos del GPPS y HIPS.

— *Poliestireno expandido (EPS)*

Conocido popularmente como porexpan. Se obtiene a partir de perlas de poliestireno expandible, es decir, PS con aditivos y con un agente expansor en su interior de bajo punto de ebullición, normalmente pentano. Primero se realiza una preexpansión mediante vapor de agua a 80-110 ℃. Tras un reposo y enfriamiento, las «bolitas» llenas de aire y de baja densidad en que se han convertido las perlas de PS pasan a la fase de expansión y moldeo, donde de nuevo con vapor agua y dentro de un molde se acaban de expandir y se sueldan entre sí tomando la forma del molde. La demanda mundial de EPS es aproximadamente de 4 millones de t y Europa consume aproximadamente el 27%.

La Figura 13.5 muestra los principales usos del EPS.

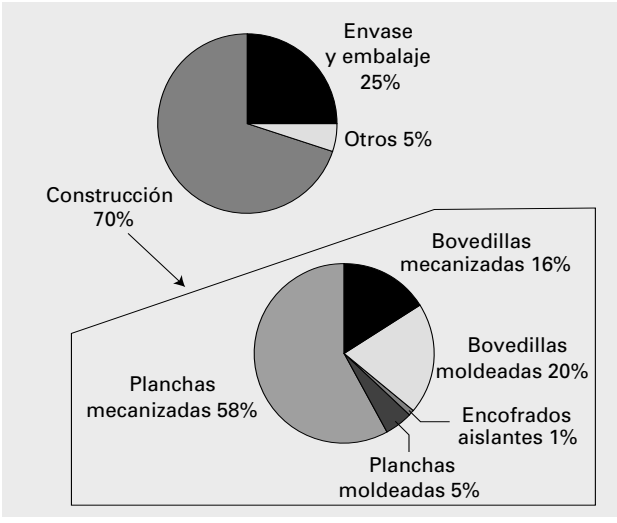


Figura 13.5. Usos del EPS.

El EPS de envase y embalaje doméstico se recupera mediante la recogida selectiva municipal y puede ser reciclado con una tasa del 30%. La principal dificultad estriba en la suciedad, que es extrema en los casos de envases de pescado y todo tipo de alimentos congelados. Estos envases no se reciclan, ya que los sistemas de reciclado no lo permiten y su única salida seria la valorización energética. Los embalajes de protección de electrodomésticos, en cambio, son ideales para el reciclado.

El EPS se recicla de dos maneras:

- *Como EPS:* se trituran las piezas de EPS limpio y el granulado se vuelve a compactar mediante un flujo de vapor caliente que funde ligeramente la superficie de los copos. Se obtienen placas y virutas de EPS para usos de embalaje protector. No se pueden obtener embalajes que encajen en piezas obtenidos por molde. También se valoriza tan sólo troceándolo como material protector de relleno para embalaje.
- *Como PS cristal:* si el material no está perfectamente limpio o simplemente si se desea obtener PS cristal, se trituran las piezas de EPS y se hacen pasar por una extrusora para obtener placas de PS cristal. Este proceso permite filtrar el material (cuando está fundido), pero aún así no se puede introducir EPS con muchos restos orgánicos (suciedad) ya que dañaría el proceso de extrusión.

La Figura 13.6. muestra las vías de reciclado de EPS en Europa, partiendo de un 30-40% de recuperación (reciclado y valorización energética) y el resto vertido.

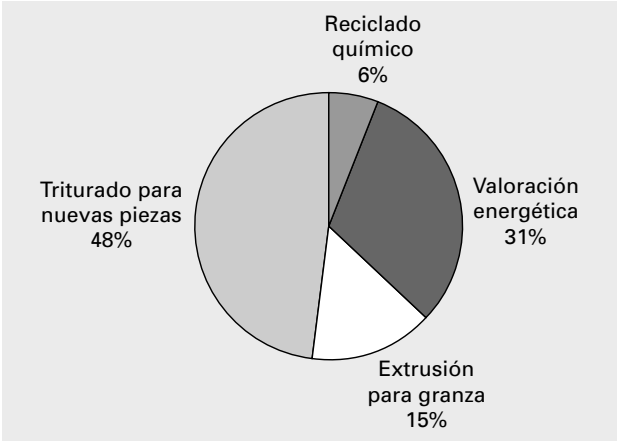


Figura 13.6. Vías de recuperación de EPS en Europa.

— *ABS /SAN*

El polímero termoplástico ABS está compuesto de acrilonitrilo, 1,3-butadieno y estireno. Es un copolímero amorfo con una matriz de SAN. Ofrece muy buenas propiedades de dureza, rigidez, resistencia al calor y al ataque químico y es fácil de procesar.

El SAN es un polímero de estructura amorfa compuesto de estireno y acrilonitrilo, en una proporción aproximada de 15-35% de acrilonitrilo. Mayores proporciones incrementan la dureza, resistencia mecánica y la resistencia al calor y el ataque químico. Se utiliza principalmente en aplicaciones que requieren transparencia y resistencia, como iluminación, aparatos médicos o electrodomésticos.

En el DVD adjunto, en el punto 3, se muestra información suplementaria sobre el reciclaje de poliestireno (EPS).

4. Flujo de residuos plásticos

La diversidad de objetos y aplicaciones en que se utilizan plásticos implica que los ciclos de vida de estos materiales sean también muy diferentes. Un envase ligero para productos perecederos tendrá sólo unos días de vida útil, los componentes plásticos de un electrodoméstico o un coche durarán 5-15 años y los utilizados en construcción (carpintería, aislantes, tuberías) deberán durar más de 30 años. Además de la dificultad de obtener datos fiables de consumo y generación (exportaciones/importaciones, materiales no declarados), la acumulación de los materiales en hogares e industrias es el otro factor que explica el consumo superior a la generación de residuos plásticos.

La Tabla 13.7 muestra el consumo aparente de plásticos y la generación de residuos en España (año 2000) en miles de toneladas.

Tabla 13.7. Consumo de plásticos y generación de residuos en España (miles de t)

	Consumo aparente	Generación de residuos
Envases	1.199	1.193
Resto aplicaciones	2.718	1.905
Total	**3.917**	**3.098**

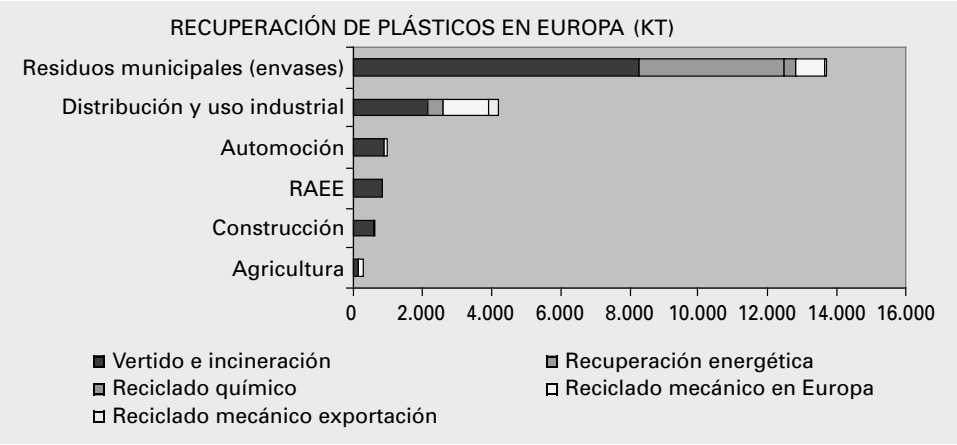


Figura 13.8. Recuperación de plásticos en Europa (miles de t).

Aproximadamente en España de los 4 millones de toneladas de plástico que se utilizaron, 3 millones de toneladas se convirtieron en residuos. En el año 2003 se recuperaron 621.000 toneladas, de las que se recicló el 53% y valorizó energéticamente el 47%. El resto hasta las 3 t, fue a parar a vertedero (50%) o no se gestionó adecuadamente (30% sin aflorar).

La Figura 13.7 muestra el tipo de tratamiento de los residuos plásticos en Europa (15 países) según el origen de los residuos en el 2002, en la que se aprecia que el vertido es la vía de gestión predominante. Este dato es especialmente relevante en el caso de los residuos municipales, donde el plástico es principalmente procedente de envases.

La Figura 13.8. muestra las toneladas de residuo plástico generado por sectores e indica el porcentaje de recuperación de cada uno de los tipos, entendiéndose por recuperación el reciclado y la valorización energética. Destaca el máximo porcentaje de la recuperación en el sector industrial, debido a la mejor calidad de los residuos que favorece económicamente su reciclado.

4.1. EL PLÁSTICO EN LOS RESIDUOS MUNICIPALES: ENVASES

La composición en peso de los residuos municipales se reproduce en la Tabla 13.8. Estos datos corresponden a Cataluña en 2004.

El 84% de la población española tiene acceso a la recogida selectiva de envases ligeros (contenedor amarillo), es decir, el 100% de los residuos de envase y embalaje de uso doméstico podrían ser depositados en el contenedor amarillo para su recupera-

Tabla 13.8. Ejemplo de composición en peso de los residuos en una ciudad grande.

Fracción	% en peso
Papel/cartón	18,5-21
Vidrio	5-10
Envases (25% en peso de plástico)	12,5-16,5
Fracción fermentable	38-42,5
Otros (voluminosos, jardinería, peligrosos domésticos)	18-22,5

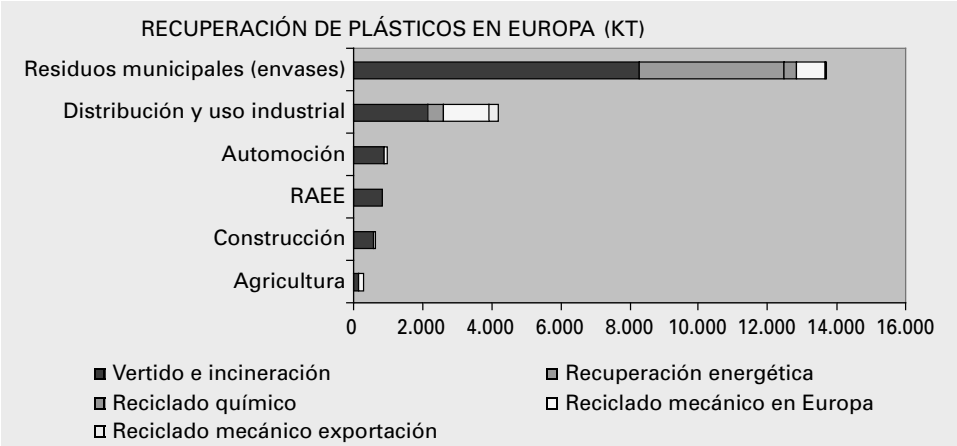


Figura 13.8. Generación de residuos plásticos por sectores y porcentaje de recuperación.

ción. La realidad es que muchos de estos envases acaban en el contenedor erróneo y que muchos residuos que no son envases van a parar al contenedor amarillo, que recoge alrededor de un 23% de impropios. La recogida selectiva en contenedor amarillo de tapa cerrada alcanza rendimientos de recuperación del 70% en las plantas de selección, mientras que la realizada en contenedor de tapa abierta contiene muchos más impropios y hace que la recuperación sea muy baja.

Hay dos vías según la legislación para que los fabricantes y comercializadores de productos envasados gestionen los residuos en que se convertirán dichos envases. El Sistema Integrado de Gestión (SIG) y el Sistema de Depósito, Devolución y Retorno (SDDR).

En el DVD adjunto, en el punto 4, se muestra información diversa sobre técnicas de reciclado de plásticos.

4.1.1. Sistema integrado de gestión (SIG)

El Sistema Integrado de Gestión es una organización a la que se adhieren las empresas y a la que pagan por cada envase puesto en el mercado para que se haga cargo de recuperar los residuos y valorizarlos cumpliendo con los mínimos establecidos por ley. El SIG español, Ecoembes, tiene casi 12.000 empresas adheridas y en 2003 se gestionaron a través de él 1.852.393 toneladas y se recuperaron 1.096.000 toneladas de residuos de envases, de las que casi 300.000 se valorizaron energéticamente y el resto se reciclaron, un 73%. Por materiales: 467.894 de papel/cartón, 183.651 de metales, 140.660 de envases plásticos y 9.872 de madera.

El sistema integrado de gestión conocido como Punto Verde (Ecoembes en España, pero reconocido como punto verde por su logo en toda Europa) funciona acoplado a la gestión de los residuos municipales por parte de las administraciones, ya que éstas son las encargadas de ofrecer y exigir a los ciudadanos la separación y recogida selectiva de las diferentes fracciones recuperables, entre ellas los envases. Con el SIG, el sistema mayoritario en España, los materiales que se recogen en contenedor amarillo y se separan en las plantas son:

- Envases de PEAD.
- Films PEBD.
- Envases PET.
- Envases PVC.
- Envases de plásticos mezcla.
- Brics.
- Papel/cartón de envase.
- Aluminio.
- Acero.
- Madera.

En Europa la normativa sobre envases y embalajes ha ido estableciendo paulatinamente objetivos de reciclado más altos. Asimismo ha ido adaptando las exigencias a las posibilidades de reciclaje que se han observado con la experiencia y la efectividad y conveniencia según los ACV. La Directiva 2004/12/CE marca un mínimo global del 51% y de valorización del 60% que deben ser cumplidos al finalizar 2008.

La reducción del peso de los envases es consecuencia de la mejora de las características de los materiales con que están fabricados. Esto supone también menos residuos en términos de peso. En España, desde los inicios del uso masivo del plástico como material de envase se ha reducido el peso de los envases aproximadamente un 47%.

El coste del SIG para plástico en España se sitúa alrededor de los 0,2 €/kg. Este importe no cubre el coste total de la recogida (contenedores, recolección) y tratamiento de los envases, que debería ser más elevado y que actualmente asume la administración pública.

4.1.2. Sistemas de depósito, devolución y retorno (SDDR). El caso particular del PET

El sistema de depósito, devolución y retorno se basa en la posibilidad de comprar los productos envasados, pagar un depósito y devolver los envases vacíos en el mismo comercio para recibir el depósito. Los envases y posiblemente las cajas que los agrupan, van del fabricante al comercio minorista, a casa del consumidor y de nuevo al minorista, que devuelve cajas y envases al fabricante para que éste los lave y vuelva a utilizar, en el caso de envases reutilizables, o para que gestione los residuos en caso de ser de un solo uso.

En los sistemas de SDDR una de las dificultades de la recuperación de botellas de PET es que las de volumen inferior a 1-1,5 litros suelen ser usadas para productos de consumo «para llevar» por lo que el punto de compra y de disposición pueden ser totalmente dispares. El pago en depósito por las botellas en aquellos países donde han implantado este sistema parece lograr altas tasas de recuperación, espe-

cialmente ofreciendo a los consumidores sistemas automáticos de retorno del envase en máquinas parecidas a las de *vending*. En Alemania se han alcanzado tasas del 90% de recuperación y en Noruega y Suecia del aproximadamente el 80%.

A pesar de estos datos, la tasa global en Europa de recuperación de las botellas de un solo uso de PET se calcula alrededor del 30%. Se utiliza principalmente en el envasado de agua y de refrescos de un solo uso, del que se calcula que suponen el 40% de los envases puestos en el mercado. Actualmente se está desarrollando muy lentamente el mercado de botellas de PET reutilizables, que sustituirían a las clásicas de vidrio retornables.

Las cuotas de mercado de los envases de un solo uso y reutilizables y de los materiales usados en ambos casos son muy variadas según las legislaciones nacionales europeas. A pesar de disponer de una directiva de envases, la libertad de los países para endurecer las condiciones y características y costumbres de cada país hace que haya poca uniformidad en los sistemas de gestión de envases, hasta el punto que puede suponer un problema para la competencia comercial y la exportación. La directiva de envases del año 2004 marca que en el 2008 un mínimo del 60% del material recuperado (recogido selectivamente) y del 22,5% en peso de los envases de plástico puestos en el mercado, deben ser reciclados materialmente.

El SDDR es el sistema mediante el que se reutilizan típicamente botellas de vidrio y cada vez más de PET, lo que permite comparar el comportamiento de ambos materiales. El vidrio, debido a su mayor dureza y resistencia al rayado y a la temperatura y agentes de lavado, permite reutilizar los envases una media de 30-50 veces, en contraste con el PET que resiste unos 10-20 ciclos de reuso. A pesar de esta ventaja del vidrio, siempre ha habido reticencia por parte de algunos envasadores al lavado y reutilización debido a incidentes aislados de mala limpieza de los envases con gran repercusión en la opinión pública al tratarse de productos para el consumo humano.

Normalmente las botellas de un solo uso de PET las produce por soplado la propia empresa de bebidas a partir de preformas extruidas.

El comportamiento ambiental de ambos sistemas y materiales a lo largo de su ciclo de vida por lo que hace referencia al calentamiento global y la acidificación se puede observar en la Figura 13.9.

Es comprensible el mayor impacto del llenado en los sistemas de reuso tanto a efectos de calentamiento global como de acidificación debido al lavado con agua caliente y detergentes. Específicamente es más alto en el caso del vidrio que del PET

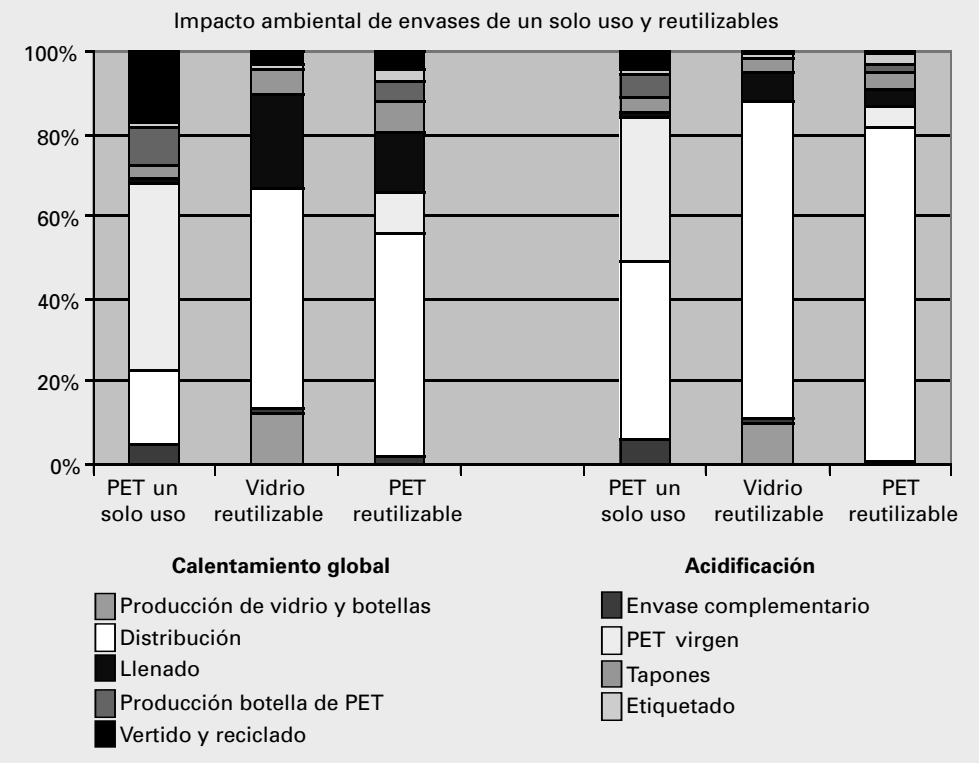


Figura 13.9. Impacto ambiental de envases de un solo uso y reutilizables.

ya que el primero permite lavados más agresivos. El impacto del transporte es también superior para los sistemas de reuso debido a la logística necesaria para la recogida de los envases y su devolución al origen. Estos sistemas, sin embargo, tienen una demanda de materias primas mucho menor y unos menores costes de reciclado, en parte porque se genera menos cantidad de residuos y porque éstos se recogen y tratan apropiadamente con más facilidad debido a su ciclo consumidor-fabricante, que evita que vayan a parar a la basura que no se recicla.

4.1.3. Selección de envases

Los tratamientos mecánicos usados para clasificar y seleccionar los residuos de envases procedentes tanto de la fracción resto de los residuos municipales en masa como de la recogida selectiva son:

- *Apertura de bolsas y separación del film:* El material se introduce en un tromel con pinchos que abre y separa a la vez, pero la eficiencia de apertura de las bolsas no supera el 85%. Hay equipos especiales abrebolsas, sobre todo utilizados en las plantas de envases ya que el poco peso hace difícil que un tromel rasgue apropiadamente las bolsas, para alcanzar el 98% de eficiencia de apertura. Las bolsas y otros filmes se separan por aspiración o manualmente.
- *Trituración:* puede realizarse varias veces para disminuir de tamaño progresivamente a lo largo de la cadena de selección, en función del diseño de la planta. La maquinaria es específica según el tipo de material a triturar y hay una amplia oferta en el mercado.
- *Separación por tamaño:* tromel inicial (paso de malla 300-350 mm), diseñado sobretodo para separar la fracción orgánica. Este sistema no es muy efectivo para la separación de envases debido a la gran variabilidad de tamaños. En algunas instalaciones se realiza manualmente antes una separación de los voluminosos impropios (baterías, electrodomésticos pequeños, etc.).
- *Separación por densidad:* el film de PEBD se separa, terminadas las fases anteriores, por mecanismos de aspiración.
- *Separación electromagnética* para metales férricos mediante imanes *overband* (suspendidos sobre la banda transportadora) y de corrientes de Foucault para aluminio. Es necesaria la presencia de un mínimo del 2% de aluminio para hacer rentable este proceso, más costoso que el electromagnético, y que detecta también el aluminio de *brics* y otros envases (por ejemplo las bandejas de precocinados), que posteriormente se deben separar de las latas.
- *Separación por sistemas ópticos/infrarrojos:* Estas tecnologías se están introduciendo progresivamente en la actualidad, ya que los sistemas usados son principalmente manuales para la separación de plásticos duros y *brics*, y manuales o neumáticos para filmes. La eficiencia en la separación de los materiales determina el grado de contaminación entre materiales y por lo tanto el uso que posteriormente se le pueda dar al material reciclado, cuanto mejor sea la separación, mejor calidad tendrá el material reciclado y se podrá utilizar en productos de mayor valor añadido. Es de vital importancia también el análisis de aditivos. Para que sea económicamente viable es importante que el tiempo de respuesta sea del orden de un segundo o inferior y que se pueda integrar el lector en un sistema automático de separación/clasificación. El sistema de espectroscopía del infrarrojo cercano (NIR) permite detectar propiedades moleculares y estructurales de los plásticos y por tanto distinguir los diferentes tipos.

En el DVD adjunto, en el punto 5, se aporta información complementaria sobre sistemas de detección y separación mediante infrarrojos.

La separación entre los envases a identificar se produce acelerando el paso de los materiales para que lleguen distanciados al lector infrarrojo, que clasifica el material impulsándolo hacia donde le corresponde mediante un chorro de aire comprimido. Los envases de PEAD, PET y mezclas se separan por infrarrojos en equipos que a la vez separan el de color del natural.

La Figura 13.10 muestra un esquema de lector óptico.

Los polímeros se diferencian entre sí estructuralmente por la presencia de grupos aromáticos o alifáticos, que es lo que detecta el espectrómetro. La presencia de plastificantes, colorantes, cargas y otros aditivos presentes en la mayoría de plásticos comerciales, o los tratamientos superficiales dificultan la identificación puesto que reducen la reflexión de la luz. Materiales con cantidades superiores a un ínfimo 0,1% de negro

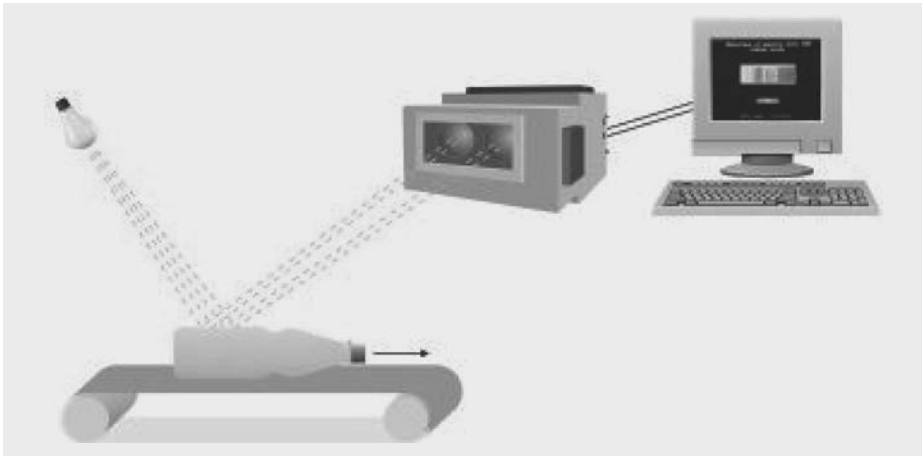


Figura 13.10. Lector óptico para selección de evases. (Fuente: www.ict.fraunhofer.de)

de carbono reducen tanto la transmisión que no pueden ser identificados.

Estos sistemas son capaces de identificar 95-98% de los materiales que procesan con un margen de error inferior al 0,1%. Para poder separar diversos materiales y colores se encadenan dispositivos de separación puesto que cada dispositivo es capaz de separar dos flujos, uno de material específico (PET, por ejemplo) y otro de resto de materiales mezclados. Este flujo mezclado pasaria a continuación por otro dispositivo que separa otro material (PEHD, por ejemplo) y dejaría un flujo mezclado que, sucesivamente se podría hacer pasar por dispositivos para separar tantos materiales plásticos como se desee y se tendría al final como rechazo de la separación los tetrabrics, papeles y otras impurezas. Respecto a los colores, asimismo, el flujo separado de PET, por ejemplo, se haría pasar por un dispositivo que separaría transparente de color. Evidentemente cuanto más se desee separar más dispositivos se necesitan y por lo tanto el coste es mayor. De igual manera, cuanto menores sean los fragmentos a separar más preciso debe ser el lector y más orificios de aire comprimido debe controlar el sistema electrónico por lo que el error será previsiblemente mayor y la complejidad del dispositivo hará aumentar su precio.

Compactación, prensado y embalado: las botellas, una vez separadas ya por material, pasan por un sistema de pinchado de botellas para poder luego compactarlas sin problema, en caso de que estuvieran sin arrugar y cerradas con tapón. Las diferentes fracciones separadas se prensan en balas. El film plástico también se prensa aparte alcanzando la densidad aparente de 250-350 kg/m^3.

Puede ser que la planta de separación tenga su propio sistema de reciclado o que se limiten a distribuir los materiales separados a los recicladores específicos en balas compactadas para facilitar el transporte.

Inicialmente la separación se realizaba manualmente, con la excepción de los metales, pero es un sistema demasiado caro que tendía a minimizar el personal, dando resultados de recuperación demasiado bajos y progresivamente se han ido introduciendo sistemas automáticos. La configuración de la planta en mayor o menor grado de automatización, ya sea de selección de residuos en masa o de envases específicamente, depende del volumen de residuos a tratar y de la inversión disponible. Es habitual la instalación de plantas manuales en pequeñas poblaciones, en las que las tasas de recogida selectiva son mayores, hay pocas impurezas o materiales impropios y donde el volumen de residuos a tratar es menor. Se tiende a la máxima automatización para tratar los residuos en masa, en grandes cantidades (a partir de 3t/h) y con proporciones de impropios elevadas.

En el DVD adjunto, en el punto 6, se muestran numerosos materiales fabricados a partir de plástico reciclado.

La configuración de procesos para la selección de los envases es función del tipo de recogida que se realiza de los residuos y por tanto de la composición de los residuos que entran a la planta.

Un esquema general de una planta automática de selección de envases recogidos selectivamente podría ser la mostrada en la Figura 13.11.

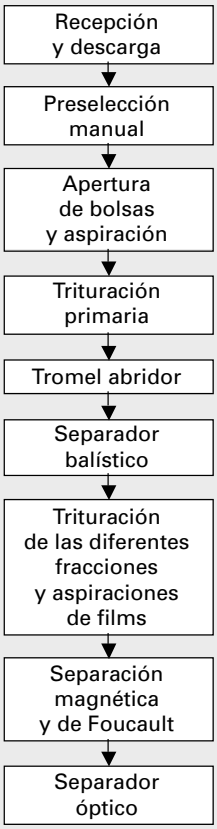


Figura 13.11. Esquema ideal de planta de selección automática de envases postconsumo.

4.2. PLÁSTICOS EN AUTOMOCIÓN

Aproximadamente el 11% del peso, un promedio de 113 kg, de un vehículo es plástico, lo que aligera el peso total y supone un ahorro de combustible valorado en 1.000 litros de combustible a lo largo de su ciclo de vida. Esta proporción se prevé que vaya en aumento, ya que también la mejora de las prestaciones de los materiales plásticos los hacen aptos para cada vez más aplicaciones, como válvulas y componentes en contacto con los combustibles o piezas resistentes a la abrasión y el calor. Un ejemplo de ello es el desarrollo de materiales para adaptarse a las características de acidez de los biocombustibles.

En España se estima un consumo de alrededor de 400.000 t de materiales plásticos en este sector, con una distribución como la mostrada en la Figura 13.12. Los materiales agrupados como otros son muy diversos, resinas fenólicas, alquídicas, epoxi y POM (polióxido de metileno), entre otros. Esta variedad da una idea de la dificultad de reciclaje.

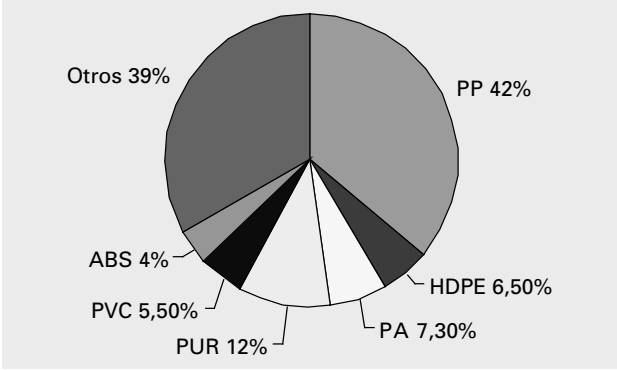


Figura 13.12. Presencia de los diferentes polímeros en automoción.

Los principales inconvenientes para el reciclado mecánico de plásticos de automoción son:

- *Composición:* en muchos casos se trata de materiales denominados plásticos técnicos, muy aditivados para que ofrezcan las propiedades específicas que se requieren y por tanto difíciles de someter a reciclado mecánico.
- *Multicomponente:* muchas piezas son multicomponente y sándwich, que impiden una correcta separación y por tanto su valorización se limita a poder ser reciclados en la elaboración de productos de bajo valor añadido o simplemente imposibles de recuperar con la tecnología actual, sobre todo en el caso de plásticos reforzados.
- *Múltiples piezas:* el desmontaje de las piezas, en muchos casos de reducido tamaño y de diversos materiales, es muy costoso.

La directiva de VFU establece tasas de reciclabilidad para los diferentes materiales de los vehículos, por lo que la tendencia es a fomentar la facilidad de desmontaje y los materiales monocomponente.

4.3. PLÁSTICO EN LA CONSTRUCCIÓN

En España se estima una producción anual de residuos de construcción y demolición (RCD) de 35 millones de toneladas y en Europa de 180 millones de t.

La legislación europea no regula específicamente el flujo de residuos de construcción y demolición, sino que queda englobado dentro de las regulaciones de residuos. La legislación española tampoco tiene normativa específica, pero sí ha desarrollado un Programa de Gestión de RCD. En Cataluña sí hay un decreto específico (201/1994, mo-

dificado por el 161/2001, regulador de los derribos y otros residuos de construcción), que principalmente marca la obligación de gestionar correctamente estos residuos mediante gestores autorizados y declararlo ante la administración. Respecto a la separación de los materiales inherentes a un derribo, no hay mínimos de reciclaje a cumplir ni obligaciones concretas sino meras recomendaciones. En el Capítulo 14 de esta obra se trata extensamente esta temática desde el punto de vista de la valorización para obra civil.

El plástico tiene un papel importante en estos residuos, ya que se encuentra en:

- Embalajes plásticos y film de los materiales de construcción durante la etapa constructiva.
- Moquetas, pavimentos, mobiliario y aparatos: estos residuos típicamente no deberían encontrarse en los edificios a derribar, pero es muy habitual no vaciarlos correctamente. Estos residuos aparecen posteriormente separados en las plantas de machaqueo y recuperación de áridos a partir de escombros. No deberían ser considerados RCD sino ser desviados al proceso específico de reciclado que corresponde a cada uno de estos tipos de residuos.
- Tuberías, tubos de cableado, cables: principalmente PVC, con la dificultad añadida de ser residuos con una gran suciedad y en el caso de los cables conductores eléctricos con muy poco atractivo para el reciclado mecánico de la parte plástica, generalmente sólo se recupera el metal.
- Carpintería: fácilmente segregable pero difícilmente recuperable por la constitución de las piezas.
- Las espumas de PUR: estos materiales no se pueden recuperar debido a que han sido proyectados sobre las paredes y techo. Sin embargo merecen una mención especial debido a que se utilizan freones como gases de expansión, lo que ha ocasionado episodios de alergias que obligan a replantear su idoneidad.

En la mayoría de los casos estos materiales plásticos contienen aditivos retardantes de llama como medida de seguridad contra incendios. Debido a que en construcción los materiales tienen una vida muy larga se encuentran todavía retardantes de llama anticuados mucho más tóxicos, entre los que se pueden destacar:

- HBCD hexabromociclodecano: principalmente en las espumas de poliestireno. Es tóxico aunque no se ha demostrado científicamente que sea carcinogénico.
- DBPO óxido de decabromodifenilo: en el EPS y en los aparatos eléctricos (contadores, electrodomésticos no recogidos, etc).
- Trióxido de antimonio: principalmente en revestimientos de paredes, pinturas y textiles (tapicerías).
- Fosfatos orgánicos: son los retardantes de llama predominantes, de domostrada neurotoxicidad y son carcinogénicos. Entre ellos se cuentan tris-mono y di cloropropil fosfato (textiles, látex, PUR),
- Parafinas cloradas: carcinógenos demostrados, se usan en revestimientos polivalentes para paredes, piscinas, revestimientos aislantes, etc.

Los plásticos, aunque representan una parte minoritaria de los RCD en peso, no se han cuantificado correctamente ni evaluado la conveniencia y ventajas de las diferentes opciones de reciclado o las mejores tecnologías para ello. Con este fin se ha iniciado el programa *Life Appricod* (*Assessing the potencial of plastics recycling in the construction and demolition activities*, Evaluación del potencial de reciclado de los plásticos en las actividades de construcción y demolición) en la UE.

En España se inició en el año 2000 un programa de reciclado de tuberías plásticas, especialmente PVC, denominado Ciclotub. En el 2003 se recuperaron 30 toneladas de estos residuos, cantidad muy pequeña que se puede explicar por el bajo coste de vertido en masa de los residuos, el alto coste de separarlos, el bajo valor de mercado de este plástico residual y sobre todo por el nulo incentivo económico ofrecido por la administración y la falta de obligatoriedad de su recuperación.

Al margen de los residuos que genera este sector, la construcción podría absorber gran cantidad de residuos plásticos para diferentes aplicaciones, como el poliestireno expandido (comúnmente porexpán) reciclado para aligerar hormigones, el material usado en los sistemas de entubado de cables, pavimentos, aislantes acústicos y térmicos. Para todas estas aplicaciones hay materiales procedentes del reciclado disponibles y, aunque en algunos casos están ampliamente aceptados, en otros todavía es necesaria la promoción y sensibilización o bien la obligación de usarlos.

4.4. RESIDUOS DE APARATOS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS (RAEE)

Actualmente se estima en Europa una generación per cápita de RAEE de entre 12-20 kg/persona y año, con una generación total de entre 6-8 millones de t anuales. Inicialmente estos aparatos eran considerados un residuo municipal y seguían la vía de gestión de éstos, es decir, se mezclaban con los residuos del hogar acabando en vertedero o incineradoras, con los problemas que conllevaba al liberar las sustancias contaminantes de algunos de sus componentes. El principal problema era el derivado de la movilización de los metales pesados en los vertederos y la emisión de halógenos en la incineración. Posteriormente se optó por establecer la vía de recogida del punto limpio municipal para separarlos del flujo de residuos urbanos en masa y poder tratarlos específicamente en las plantas de reciclaje que se han ido implantando en el territorio, aunque todavía no ofrecen la capacidad de tratamiento necesaria.

Finalmente, la Directiva comunitaria 2002/96 sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) establece la obligatoriedad para los productores y distribuidores de hacerse cargo de los aparatos que han puesto en el mercado una vez acabada su vida útil. Esta directiva, transpuesta ya a la legislación estatal, ha supuesto la agrupación de fabricantes y asociaciones profesionales para crear sistemas integrados de gestión a imagen y semejanza de los ya establecidos para los envases. Actualmente en España hay varios SIG constituidos y las empresas inician los trámites para asociarse a ellos, por lo que en los próximos años se asistirá a un desarrollo de las plantas de reciclado y la tecnología para ello, y se podrá contar también con datos fiables de tasas de recogida y valorización.

En el caso de los RAEE, los objetivos establecidos por la legislación son recuperar 4 kg/persona y año y recuperar y/o reciclar entre el 65-80% en peso, en función del tipo de residuo.

Este sector se caracteriza por utilizar una gran variedad de plásticos en un solo producto, muchas veces coextruidos o en pequeñas piezas ensambladas, lo que dificulta la recuperación. Los polímeros que destacan como mayoritarios son:

- Resina ABS: carcasas de ordenador y teléfonos. El sector eléctrico y electrónico absorbe el 63% de ABS consumido en Europa, con más de 600.000 t.
- PUR y PP: en aislamiento de grandes aparatos eléctricos, como neveras.

4.4.1. Problemática particular de los retardantes de llama

Respecto a los plásticos constituyentes de los RAEE, que suponen aproximadamente un 20% en peso, cabe destacar la problemática de los aditivos retardantes de llama. En este sentido se enfoca la Directiva 2002/95 sobre restricciones al uso de determinadas sustancias peligrosas (RoHs) de estos aparatos.

Los retardantes de llama bromados (BRF, *brominated flame retardant*, en sus siglas inglesas) son los más extendidos por su efectividad, y la normativa exige la separación de todas las piezas que los contienen de más de 10 cm^2 de los RAEE y todas las de los teléfonos móviles para ser tratadas convenientemente.

Los BFR más habituales actualmente son:

- Decabromodifenil éter (decaBDE), en HIPS de carcasas.
- Octabromodifenil éter (octaBDE), en resinas ABS.
- Tetrabromobifenol A (TBBA), en resinas ABS de placas de circuito.

El polibromobifenilo (PBB) y el penta y octa BDE no pueden ser utilizados en los aparatos eléctricos y electrónicos a partir de julio de 2006, por lo que ya han ido siendo sustituidos. La problemática radica en que muchos RAEE contienen estas sustancias, que son difíciles de identificar.

Los métodos de identificación de estos plásticos no difieren del resto, siendo la densidad superior lo que los separa ya sea por flotación o en separador de aire, junto al PVC, y requiriendo posteriormente una identificación óptica que segregue los plásticos según el retardante utilizado o el halógeno que contienen.

Estos materiales no se pueden utilizar de nuevo en otras aplicaciones mediante reciclado mecánico.

El proceso Haloclean, investigado en un programa europeo, es un sistema de pirólisis en dos etapas con dos hornos rotatorios. El objetivo es recuperar los metales preciosos contenidos en los RAEE, especialmente en las tarjetas de circuitos impresos, y separar el bromo. El bromo aparece en los aceites de pirólisis y es este aspecto el que debe ser mejorado.

Por otro lado, la valorización energética de estos residuos junto a los residuos municipales permite añadir hasta un 3% en peso de materiales bromados sin que se observen problemas de compuestos organohalogenados en las emisiones. La característica

principal es que los compuestos halogenados favorecen la volatilización de metales pesados (Cu, Zn, Sn y Sb) que pasan de las escorias a las cenizas volantes, pudiendo ser recuperados con buenos sistemas de lavado de gases.

4.4.2. Policarbonato de soportes de almacenamiento óptico, CD y DVD

Se estima que la producción mundial actual de CD y DVD es de unos 20.000 millones de unidades. En el año 2000 el consumo total de policarbonato ascendió a 350.000 toneladas para la fabricación de 10.000 millones de unidades.

El peso medio de cada unidad es de 15 g aproximadamente, de los que el 99% corresponde a la lámina de policarbonato y el resto a la deposición de capas metálicas sucesivas de aluminio, oro (en el caso de los CD regrabables), plata y la laca y pinturas. Los DVD tienen la peculiaridad de constar de dos láminas de PC unidas. En Alemania existe un sistema de gestión CD Collect, para la recogida y reciclado, mientras que en España no existe aún un mecanismo establecido sino que estos residuos siguen el flujo de los residuos municipales, ya sea sin separar o bien recogidos selectivamente a través de la red de puntos limpios. Estos elementos son considerados consumibles, por lo que no están regulados por la directiva de RAEE.

El proceso de reciclado comercialmente disponible es el desarrollado por Bayer, dado que es el mayor fabricante de PC para este tipo de aplicaciones.

El origen de los residuos de CDs para su reciclado es:

- Residuos municipales, en masa o recogidos selectivamente.
- Residuos de procesado en origen.
- Residuos comerciales y de oficinas.
- Empresas de recogida de residuos.

Como en todos los materiales, los residuos de origen sin el recubrimiento metálico, es decir la lámina de PC pura, es más fácil de reciclar. El resto debe ser separado en función de su recubrimiento y asegurarse de la eliminación de restos metálicos u otras impurezas.

Tras la clasificación en residuos metalizados y no metalizados se procede a la trituración. Los materiales con recubrimientos se tratan químicamente en vía húmeda con productos alcalinos para eliminar todas las capas. La propia mezcla y fricción entre los fragmentos ayuda al lavado y la presencia de agentes emulsionantes mantiene el recubrimiento desprendido del PC en suspensión para poderlo retirar fácilmente de esta disolución donde precipitan los metales, con especial atención a los preciosos y se recupera y recircula el álcali.

La escama de PC se puede utilizar, en mezcla con resina ABS, para la fabricación de carcasas de teléfonos móviles, aparatos de informática, etc...

También se experimenta con procesos físicos para eliminar los recubrimientos, como el fresado, lijado, el agua a presión o técnicas ultrasónicas.

Otros métodos en estudio es la eliminación mediante ataque químico con disolventes teniendo en consideración la prioridad de no dañar el PC. Como el resto de los termoplásticos, también cabe la posibilidad de grancear por extrusión la escama limpia.

En el DVD adjunto, en el punto 7, se aporta información sobre una planta de reciclaje de CD y DVD.

4.5. PLÁSTICOS AGRÍCOLAS

Los principales residuos plásticos que se encuentran en el sector agrícola son:

- *Envases:* tanto de productos fitosanitarios como para transporte de las mercancías (cajas de fruta, envase protector). Los envases que han contenido productos fitosanitarios tienen una problemática específica, ya que deben ser cuidadosamente limpiados, y las aguas de limpieza depuradas, antes de proceder a su reciclado mecánico. La limpieza encarece el reciclado, pero los materiales son fácilmente separables y reciclables. En España se ha creado un sistema integrado de gestión para este tipo de residuos, SIGFITO, dada la importancia de la hortofruticultura y la consiguiente generación de residuos de este tipo en nuestro país.
- Los envases para transporte y distribución están incluidos en el flujo de residuos municipales de envases, pudiéndose destacar las posibilidades de reutilización, la sustitución del plástico por otros materiales como la madera o el cartón y la utilización de polímeros biodegradables.
- *Residuos de plasticultura:* plásticos de invernadero, acolchado y túnel. Los principales problemas para el reciclado de estos materiales son la suciedad (humedad del 20% en peso, tierra y productos químicos adheridos del 15% en peso),

la degradación (debida a la exposición solar e intemperie, hongos) y composición (plásticos complejos muy aditivados). Por otro lado, la elevada estacionalidad que presentan estos cultivos y la dispersión en el territorio dificulta su recolección. La generación de este tipo de plásticos es un problema reciente y en aumento, por lo que no hay una cultura ni sistemas establecidos para la recuperación y, en muchos casos la gestión es inadecuada o inexistente. En alguna de las zonas de España más afectadas por esta problemática, como Huelva o Almería, los ayuntamientos han habilitado los Puntos Limpios para que se dispongan allí estos residuos, disposición de contenedores específicos para cada finca de cultivo o servicios de recogida similares a los de los residuos urbanos voluminosos para fomentar la correcta gestión. También hay que tener en cuenta para la recogida la baja densidad y el volumen de estos residuos, por lo que suele utilizarse camiones compactadores. El principal destino de estos plásticos es el vertido, en muchos casos incontrolado, ya que es la opción más barata. El aumento de las posibilidades de reciclado de este tipo de materiales pasa por la mejora de los procesos de reciclado, la sustitución por materiales biodegradables y la valorización energética y química.

- *Otros:* cuerdas, guías o tutores, redes. Instalaciones de cultivo hidropónico. Complementos para el cultivo. La principal problemática de estos plásticos no se encuentra en su reciclado sino en el hecho de que en gran medida se quedan fragmentados en el suelo o enredados en los cultivos y no se recuperan *in situ*. La opción más viable es la adopción de materiales biodegradables para estos usos, como plásticos biodegradables o cuerda y malla de papel.

Materiales usados en agricultura:

- *Filmes:* El gran desarrollo de estos materiales comienza en los ochenta y noventa, cuando se consiguen filmes de altas propiedades. Se calculan más de 100.000 ha de invernaderos en la cuenca mediterránea, donde destaca España con más de 50.000 ha, a las que se deben añadir los cultivos con acolchado, unas 150.000 ha en España y en rápido aumento. Usados en:
  - *Invernaderos:* técnica muy extendida y por tanto de menor crecimiento usada en horticultura y el cultivo de plantas ornamentales. Los materiales usados son principalmente PEBD y mezclas de PEBD con copolímeros EVA y PE lineal.
  - *Acolchado* o *mulching*: técnica muy usada, consistente en la extensión de una cubierta plástica sobre el terreno para proteger los cultivos de los cambios de temperatura día/noche, evitar la formación de malas hierbas (cubierta negra con el cultivo creciendo por encima de ella), depredadores. Se utiliza principalmente PE lineal y PEBD.
  - *Túneles:* pequeños túneles similares a los invernaderos, con estructura sustentando plástico transparente, usada principalmente en horticultura para acelerar la maduración de las cosechas. Los materiales más usados son PEBD y los copolímeros EVA.
  - *Balsas de riego:* principalmente se usa PVC.
- *Mallas y cuerdas:* de sombra y tutorado.
- *Sistemas de riego:* tuberías, válvulas: PE y PVC.

La distribución de plásticos en agricultura en España se estima como muestra la Figura 13.13.

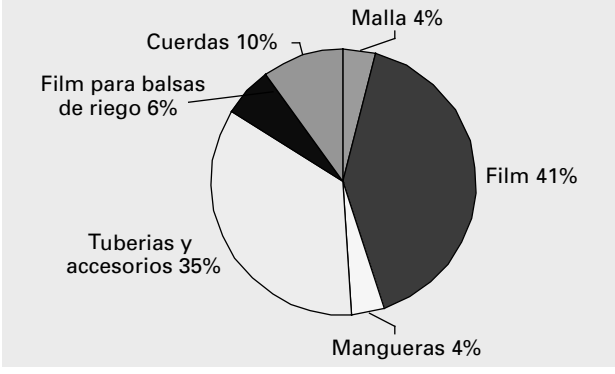


Figura 13.13. Uso de plásticos en agricultura en España (2000).

4.5.1. Reciclado de plásticos agrícolas

Los tres sistemas básicos de reciclado se exponen seguidamente.

Reciclado mecánico

En función del grado de suciedad del material puede ser necesario más de un ciclo de lavado. Se separan, por decantación, la tierra y piedras y las aguas deben ser intensamente tratadas debido a los productos fitosanitarios contaminantes que contienen. El coste

del tratamiento de las aguas de lavado representa aproximadamente un 8% del coste total del reciclado. El menor espesor también afecta al porcentaje de suciedad de los filmes, llegando hasta el 80% en peso en los plásticos finos de acolchado que han estado en contacto directo con el suelo. El gasto energético para el lavado puede oscilar entre los 0,12 kW/kg para filmes de 150 micras y los 0,3 kW/kg de los filmes de 40 micras. Esto añadido a la menor cantidad de material reciclado hace muy poco rentable el reciclado.

- *Prelavado:* las balas compactadas (aproximadamente de 1 m^3 y unos 500 kg) se trocean por desgarro en láminas de aproximadamente medio metro cuadrado y se aclaran y centrifugan con agua para separar el grueso de la tierra adherida (aproximadamente 60%). Posteriormente se trocea hasta los 20 cm^2 en un molino con presencia de agua. Cuanto menor es el espesor del film mayores dificultades presenta la trituración, ya que se forman tiras y fibras que se enrollan en las cuchillas y que se ondulan o rizan, dificultando el lavado posterior.
- *Lavado:* los fragmentos se sumergen en agua para eliminar por decantación los inertes y los plásticos, puesto que el PE tiene una densidad inferior al agua pero no así el PVC. El lavado se realiza mediante la agitación del tanque con palas que favorece la fricción entre los trozos de plástico. Se elimina el agua y se aclara tantas veces como sea necesario. Una vez limpio se compacta para eliminar el agua y se vuelve a triturar en molino hasta el tamaño de 1 cm^2, con una humedad del 12% aproximadamente.
- *Secado y ensilado:* normalmente se seca mediante aparatos ciclónicos hasta el 1% de humedad y se ensila.
- *Extrusión:* Se puede extruir para grancear o añadir directamente el troceado a un nuevo proceso. El gasto energético de la extrusión de films también es inversamente proporcional al espesor, calculándose en 0,4 kW/kg para filmes de 150 micras y 0,9 kW/kg para los de 40 micras. Lo habitual es el granceado porque el transporte del material troceado es muy caro dedido a su baja densidad y poco valor añadido.

La utilización de la granza o escamas de filmes plásticos se encuentra con los mismos problemas de cualquier plástico, la pérdida de propiedades en el segundo uso, la mezcla de diferentes plásticos y colores (en este caso principalmente natural y negro). Es especialmente acusado el problema de la degradación del material por la exposición al sol y la intemperie, que hace que en muchos casos no tenga sentido el reciclado mecánico debido a los costes del proceso y la poca calidad del material reciclado. Paralelamente, la composición de los plásticos usados en agricultura para dotarlos de las propiedades ópticas, de flexibilidad y resistencia adecuadas hace que la granza reciclada no pueda ser utilizada en la elaboración de nuevos filmes en grandes cantidades, sino que se limita al uso en productos de baja calidad como perfiles, macetas, etc.

Es lógico pensar que una dificultad añadida es la mezcla de materiales en mejor y peor estado de suciedad y degradación que hacen casi imposible el ideal de aplicar únicamente la intensidad de tratamiento necesaria y destinar a los usos posteriores los residuos en función de su calidad una vez mezclados.

El reciclado químico de estos materiales no difiere del resto y no hay experiencias comercialmente operativas, excepto en una planta ubicada en Castellón (España) donde se valoriza por gasificación.

La valorización energética es la única opción para aquellos materiales muy degradados por la exposición a la intemperie. En este sentido se realizaron pruebas en la central térmica de Carboneras, Almería (España), coincinerando con carbón. Respecto a este combustible tiene las ventajas de disminuir las emisiones de CO_2 y la generación de cenizas (debido al menor contenido en carbono del plástico) y de óxidos de azufre (debido al elevado porcentaje de azufre del carbón nacional). Por otro lado el poder calorífico del plástico es superior al del carbón (PCI de 9.500 kcal/kg del PE frente a 6.300 del carbón), por lo que se debe eliminar la cantidad de carbón equivalente en PCI a lo que se aporta en forma de plástico en instalaciones no diseñadas específicamente para plásticos. También es factible la utilización como combustible en cementeras. Para la valorización energética es necesaria igualmente la trituración, lavado, secado y aglomerado de los residuos.

5. Vías de reciclaje

Las diferentes opciones de reciclado están condicionadas por el material residual que se desea reciclar. Unos residuos muy sucios, con materiales mezclados, compuestos o de composición demasiado específica (muchos aditivos y cargas) resultaran extremadamente difíciles de reciclar mecánicamente. La clave, y la dificultad, es una buena separación en origen; los materiales en masa solo pueden ser valorizados química (y con restricciones) o energéticamente o bien su reciclado mecánico es muy costoso o resulta en un producto de poca calidad y poco valor añadido.

Se puede distinguir entre reciclado:

- *Primario:* la reincorporación de los residuos de producción al proceso, como las rebabas y las piezas defectuosas.
- *Secundario:* la introducción de granza reciclada para la elaboración de nuevos productos, normalmente con menores exigencias de calidad o bien incorporándola en una pequeña proporción.
- *Terciario:* la descomposición de los residuos plásticos en productos químicos sencillos para la síntesis de nuevas sustancias o la obtención de energía. Generalmente se refiere como reciclado químico si se obtienen monómeros de los plásticos originales o gas de síntesis y como valorización energética si se produce la combustión de los compuestos de descomposición del plástico.

5.1. RECICLADO MECÁNICO

El reciclado material de plásticos idealmente debería permitir utilizar el producto reciclado en el mismo proceso de producción que originó el residuo. La pérdida de características en cada ciclo de reciclado hace que a la práctica se deba utilizar en productos de menores requerimientos técnicos y por tanto de menor valor añadido, por ejemplo bolsas de basura, tuberías de riego, piezas no visibles. El reciclado en origen, sin embargo, siempre ha existido, puesto que las propias empresas reintroducen en su proceso las mermas, retales o piezas defectuosas hasta un 30% sin perder por ello calidad en el producto final. Esto es posible debido a que el material que se recicla es exactamente el mismo que la materia primera que se utiliza, incluyendo el color, de gran importancia.

Por otro lado algunas aplicaciones, como el soplado de film, han evolucionado tecnológicamente hasta velocidades de producción de 60-80 m/min y más de 200 kg/hora, lo que limita la calidad del material de entrada, que no puede tener ningún tipo de impureza.

Los materiales reciclados suelen mantener una mayor estabilidad en los precios que los vírgenes, sujetos a la variabilidad del precio del petróleo, aunque un aumento del precio del material virgen de manera prolongada impulsa al alza el precio del reciclado.

Una de las principales dificultades del reciclado de plásticos es que la mayoría de productos están hechos con mezclas de plásticos o capas múltiples que no se pueden separar o que tienen una gran parte de cargas, aditivos y pigmentos. Los termoplásticos puros por colores separados son perfectamente reciclables y por tanto tienen valor en el mercado. Así, los residuos de producción (rebabas, recortes, piezas defectuosas) de, por ejemplo, tapones de botella de agua, son fácilmente triturados y extruidos para elaborar granza reciclada que, aunque tendrá unas menores propiedades que la granza virgen, es apta para añadir a la elaboración de productos de calidad y por tanto tiene valor en el mercado. El siguiente ejemplo muestra los tres aspectos básicos para la reciclabilidad desde el punto de vista de la calidad de los plásticos:

- *Material puro:* con pocas cargas ni aditivos sofisticados que dificulten el procesado y las opciones de aplicación posteriores.
- *Monocolor:* si los restos son de colores mezclados pierden mucho valor en el mercado, porque solo podrán ser usados para la elaboración de materiales oscuros y teñidos o bien ocultos.
- *Procesado una sola vez:* a medida que los termoplásticos sufren procesos de fundido van perdiendo propiedades.

El origen del plástico reciclado utilizado en España es el mostrado en la Tabla 13.9.

Tabla 13.9. Origen del plástico reciclado en España

Residuos de producción	47%
Envase postconsumo	19%
Agrícola	18%
Automoción	2%
Comercial	7%

Los residuos plásticos se manufacturan mediante los procesos que se explican en los siguientes apartados.

5.1.1. Reducción de tamaño

Para optimizar logística y económicamente su recogida y transporte es necesario hacer más denso el residuo. El principal problema de la recogida de residuos plásticos, principalmente envases ligeros, es el ratio volumen/peso que hace que los contenedores urbanos se llenen con facilidad conteniendo poco residuo en peso y que por tanto el transporte sea muy caro. Los vehículos requieren el mismo personal y mantenimiento y casi el mismo combustible tanto si transportan una carga completa como si el material es poco compacto y transportan principalmente aire.

1. *Cortado/compactado:* idealmente en origen, en casa o en la empresa, implicaría reducir el tamaño de los envases, ya sea comprimiendo las botellas (que están diseñadas o deberían estarlo para poder compactarse a mano) o cortando aquellos envases que no se pueden compactar y ocupan demasiado espacio. Progresivamente se van introduciendo en España aparatos de compactación de envases previa disposición en el contenedor, ya sea en casa o más habitualmente en el propio contenedor, como los compactadores de latas o de bolsas enteras conteniendo los envases desechados. Esto es difícil por la gran variedad de formas y tamaños de los envases y porque el sistema de recogida imperante en España (y la mayoría de Europa) actualmente aúna en un solo contenedor diversos materiales que no siempre es favorable compactar conjuntamente puesto que para su reciclado deberán ser separados.
2. *Aglomeración/compactación:* en balas de gran tamaño. Se realiza en las plantas de transferencia una vez se han separado los diferentes tipos de plástico o en los propios camiones de recogida. También hace referencia a la compactación con calor de masas postconsumo para luego cortar en piezas más pequeñas.

5.1.2. Procesado

Las técnicas de procesado de materiales plásticos más habituales son:

1. *Extrusión:* utilizado para homogeneizar los residuos plásticos ya triturados que tengan unas características similares o estén completamente separados. La extrusión implica someter el material a calor y presión para que funda perdiendo el mínimo de características posibles. Se obtienen placas o barras que pueden ser también peletizadas. También se le puede dar forma directamente mediante un molde al final de la extrusora para obtener perfiles determinados. Es el paso previo que acondiciona la masa para posteriores procesos. Permite el filtrado, de especial importancia en caso de plástico reciclado y es el proceso usado para el granceo.
2. *Inyección:* tras una extrusión para acondicionar el material a las condiciones de inyección. El material fundido se inyecta en un molde para dar la forma del producto deseado, con o sin material virgen añadido.
3. *Soplado en molde:* Es una técnica habitualmente usada para la conformación de botellas y similares que consiste en inyectar la masa de material en un molde y presionarla contra las paredes del mismo mediante aire comprimido, siendo la parte de sujeción de la pieza la que está en contacto con la extrusora y no es soplada (la boca de la botella).
4. *Soplado de film:* típicamente bolsas y láminas de plástico. Se sopla aire comprimido en el interior de un fino tubo de material fundido para expandirlo hasta el extremo de ser una fina película cilíndrica y sin fin. Posteriormente se corta o sella para producir las bolsas o láminas. Es un proceso que no admite impurezas ni variaciones en la calidad del material, por lo que difícilmente los residuos plásticos pueden usarse para esta aplicación, tan sólo residuos de alta calidad y para elaboración de productos de baja calidad, como las bolsas de basura.

5.1.3. Productos a partir de plástico reciclado

Los usos más habituales de la granza reciclada de plástico son los mostrados en la Figura 13.14. El total de granza reciclada en el mercado en España en 2004 fue de alrededor de 400.000 t.

El plástico postconsumo tiene la dificultad añadida de la diversidad de materiales que componen la mezcla. Esto limita las características y por tanto los usos que se le puede dar. Generalmente se seleccionan los plásticos en mayor o menor medida y se extrusionan, como el Syntrewood® (marca registrada de

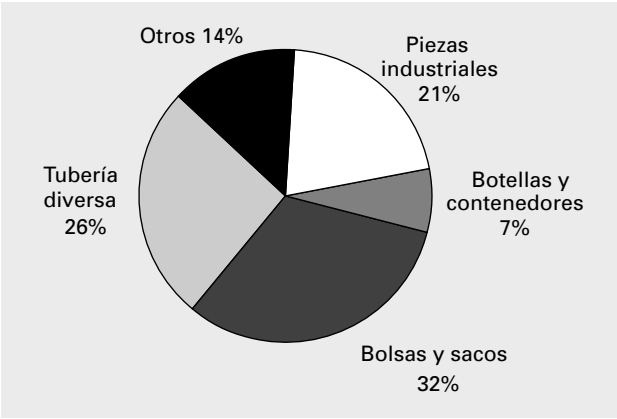


Figura 13.14. Destino de la granza reciclada en España.

la empresa Lasentiu) que permite obtener superficies curvadas y con texturas así como la pigmentación. El material producido es hidrófugo, no tóxico y reciclable al 100% y se puede mecanizar con las mismas tecnologías que la madera.

También se han hecho experimentos (UPC. Departamento de Ciencia de los Materiales, Terrassa, España) de mezcla de plásticos reciclados con serrín entre el 5-30%. La presencia de madera obliga a trabajar a menores temperaturas de extrusión para que no se degrade y le resta elasticidad, sobre todo a partir de mezclas superiores al 10%, y resistencia al envejecimiento. El objetivo de estas mezclas es el uso de residuos y la disminución del impacto ambiental global de fabricación de los productos.

Este tipo de material ha recibido el nombre de madera ecológica, ya que aúna una serie de ventajas:

- Puede estar compuesto por material 100% reciclado, tanto la madera como el plástico.
- La madera así tratada no se degrada.
- Permite fabricar paneles y perfiles de alta calidad que, a simple vista, no se diferencian de la genuina madera.

Como inconveniente hay que citar el elevado consumo energético que requiere la extrusión de este material.

Entre las diferentes aplicaciones que puede tener la granza reciclada de plástico cabe resaltar las que pueden absorber el flujo más problemático de residuos, la mezcla de plásticos.

La Figura 13.15 muestra unos bancos como ejemplo de mobiliario urbano realizado con perfiles extruidos a partir de residuos plásticos en masa en sustitución de la madera.

La Figura 13.16 muestra unos pilones separadores para el tráfico en sustitución del metal, también fabricados con plástico reciclado.

5.2. RECICLADO QUÍMICO

La pirólisis en su concepto más amplio y la hidrólisis son las tecnologías que mejores perspectivas tienen para el reciclado químico de residuos plásticos.

El objetivo de este proceso es fraccionar en monómeros el polímero específico y obtener otros productos químicos de alto valor añadido con la suficiente pureza para usarlos en la elaboración de plásticos vírgenes, o bien emplear el gas de pirólisis como materia prima para la obtención de otros materiales.

Una de las ventajas que ofrece la pirólisis es poder alimentar el proceso con plásticos mezclados, evitando uno de los cuellos de botella del reciclado mecánico.

Figura 13.15. Mobiliario urbano de plástico mezclado reciclado.

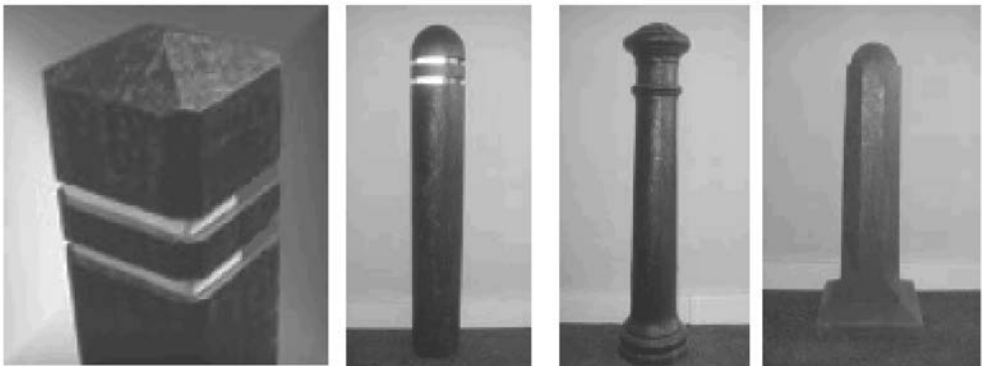


Figura 13.16. Pilones de tráfico.

Este sistema ha sido ampliamente probado para el reciclado de la poliamida procedente de moquetas tanto en Alemania como en EE UU, permitiendo recuperar la caprolactama, el monómero constituyente la PA 6 en un 85%, aunque esté asociada a otros materiales de diverso tipo presentes en el reverso de alfombras y moquetas. La principal limitación en este reciclado, además de la económica ya que el vertido representa aún una alternativa demasiado barata, se da en la variabilidad de la composición que se encuentra en las moquetas actualmente.

5.2.1. Tratamientos para el reciclado químico

Para el reciclado químico de plásticos existen una serie de tecnologías, la mayoría de ellas no desarrolladas comercialmente todavía para el reciclado de plásticos concretamente:

- *Tratamiento con disolventes:* se aplican disolventes para producir la glicólisis, hidrólisis o alcohólisis del polímero a los monómeros que lo constituyen. Es la base del proceso Vyniloop o del reciclado de resinas termoestables. Esta técnica no está muy desarrollada y tiene el inconveniente de ser específica para cada tipo de polímero en función de sus características, por lo que la mezcla de diferentes materiales en los residuos resulta un gran inconveniente.
- *Hidrogenación:* adición de hidrógeno a alta temperatura en un reactor en ausencia de oxígeno para reducir el tamaño de las cadena poliméricas. Esta técnica petroquímica se optimiza con catalizadores para la obtención de productos alifáticos.
- *Gasificación:* es la descomposición a alta temperatura de los polímeros en presencia de oxígeno en cantidades inferiores a la estequiométrica, lo que produce una oxidación incompleta, para obtener un gas de síntesis de poder calorífico bajo compuesto principalmente por CO, H_2, CO_2 e hidrocarburos.
- *Pirólisis:* es la degradación de las moléculas de gran tamaño a otras de menor peso molecular por acción del calor en ausencia de oxígeno.

5.2.2. Pirólisis y obtención de combustibles líquidos

La pirólisis es la descomposición a alta temperatura en ausencia de oxígeno (400-1000 ℃) de los polímeros y la obtención de compuestos más simples como metano, etileno, propileno, butadieno, etc., otros compuestos más complejos como parafinas, aceites y compuestos aromáticos y alifáticos y finalmente un residuo sólido carbonoso similar al coque con cenizas.

Según los parámetros de operación mediante pirólisis también se puede forzar las reacciones intermoleculares resultando en un aumento del peso molecular, con tiempos de residencia de días en el reactor, para obtener principalmente residuo carbonoso.

La pirólisis flash, con tiempos de residencia de pocos segundos y temperaturas inferiores a los 650 ℃ favorece la formación de líquidos si se enfrían rápidamente. En cambio las altas temperaturas, superiores a los 800 ℃ favorecen la formación de gases.

Actualmente no se puede hablar estrictamente de pirólisis o gasificación, ya que los experimentos abarcan desde procesos estrictamente en ausencia de medio oxidante a procesos con diferentes proporciones de oxidante, no siempre aire. Todo ello dependiendo de los productos que se pretende obtener y de la composición y características del material entrante.

Hay que tener presente que tanto los productos de la pirólisis como los procedentes de la gasificación son gases o líquidos combustibles que, al final, deberán ser oxidados para producir energía. Los modernos sistemas de pirólisis permiten la valorización energética en las siguientes etapas:

- Etapa de pirólisis: producción de los tres componentes básicos: gases, aceite y coque.
- Separación del aceite de los gases incondensables mediante condensación.
- Valorización de los aceites en turbina de líquidos.
- Valorización de los incondensables mediante oxidación.
- Valorización del coque mediante incineración. El calor generado se emplea para aportar energía a las reacciones endotérmicas.

La descomposición térmica implica que la energía desestabiliza las moléculas provocando la ruptura, bien en monómeros y/u otras moléculas más sencillas en función de la composición del plástico. Estas moléculas más sencillas asimismo pueden ser descompuestas y reaccionar entre sí, o con los catalizadores u oxidantes que se añadan, dando lugar a otros compuestos. Esto es válido para cualquier proceso térmico, lo que da la medida de la dificultad de establecer un proceso estándar y unas condiciones de operación tipo y explica la variedad de pruebas a escala experimental. Cabe destacar, sin embargo, que en la mayoría de plantas de pirólisis de plásticos, principalmente de Alemania y Japón, se obtiene energía, es decir, se realiza la pirólisis para posteriormente oxidar completamente los productos obtenidos.

Los reactores usualmente utilizados son los rotativos y los de lecho fluidizado, siendo estos últimos los que más interés despiertan por su elevada tasa de transferencia de calor que *a priori* favorece la reacción completa de las cadenas moleculares bajo los parámetros de diseño. Los inconvenientes vienen por la naturaleza del árido que compone el lecho utilizado, que puede sufrir aglomeraciones debido a la fusión de algunas de las sales presentes como carga en los plásticos. Los hornos rotatorios no son tan delicados en su operación, pero sólo admiten termoplásticos para evitar aglomeraciones en las paredes del reactor.

El PP y PE tienen un rendimiento aproximado del 34-44% de recuperación del monómero, mientras que el PMMA y el PS ofrecen rendimientos de hasta el 70%.

La formación de negro de carbón en la pirólisis de plásticos, antes descrita, se puede desestimar.

Los líquidos pueden representar un 60% del material inicial y se componen principalmente de benceno y alquitrán, que pueden ser tratados con tecnología petroquímica, tras la eliminación de cloro a niveles inferiores a los 10 ppm. A pesar de contener halógenos, incluso en el caso de pirolizar residuos con un alto contenido en PVC, no se ha detectado la formación de dioxinas ni furanos en los aceites pirolíticos. No así en el caso de los alquitranes, en los que se han detectado pequeñas cantidades (35 ppb) de furanos al pirolizar residuos de PVC.

Los gases resultantes de la pirólisis tienen un poder calorífico elevado, 50 MJ/Nm^3 Principalmente son metano, etileno y propileno en la pirólisis de PE y PP y CO y CO_2 en caso de pirolizar PA, poliéster o compuestos celulósicos.

5.3. RECICLADO MECÁNICO/ENERGÉTICO

Existe otra vía de valorizar los plásticos que consiste en introducirlo en matrices cerámicas o vítreas. Ambas tecnologías han sido descritas en los Capítulos 5 y 7, donde se explican los casos de valorización de plásticos para la creación de porosidad en sustratos agrícolas (matriz cerámica) y en vidrio celular (matriz vítrea).

En estos casos el plástico residual, adecuado a un tamaño en función de su uso posterior, se mezcla con arcilla (sustrato) o polvo de vidrio (vidrio celular) y, una vez conformada la pieza, se ceramiza a una temperatura de aproximadamente 1.000 ℃ en el primer caso o se sinteriza a 850 ℃ en el segundo caso.

En ambos casos el calor del proceso primero piroliza el plástico y a continuación lo gasifica, liberando gases y vapores que se oxidan en el interior del horno, con el consiguiente aporte de calor útil para el proceso de ceramización o sinterizado y, por tanto, ahorro energético. Estas reacciones hacen desparecer el plástico de la matriz y el espacio que ocupaba es ocupado por aire o gas, lo que confiere una porosidad a los productos que le proporcionan una excelente capacidad como aislante térmico.

6. Tendencias futuras. Bioplásticos

Uno de los objetivos en términos ambientales es conseguir un plástico biodegradable, compostable, que pueda cumplir las funciones de un envase.

Diferentes materiales se han venido desarrollando, siendo actualmente diversas marcas registradas de materiales basados en:

- Almidón: MaterBi® (mezcla de almidón de maíz con EVOH copolímero de etileno y alcohol vinílico que no es sensible hasta el 80% de humedad relativa, se producen unas 40.000 t anuales y se utiliza, entre otras aplicaciones, para la fabricación de una línea de neumáticos Biotred de Good Year, en la elaboración de los bastoncillos higiénicos, la cubertería desechable), Plantic™, EarthShell® (43% almidón de patata y 43% $CaCO_3$ y fibras celulósicas de relleno, tiene la apariencia del PS y fabrican vajillas desechables y material de embalaje, Solanyl®).
- Ácido poliláctico PLA: tienen una alta transparencia, son fáciles de procesar y son resistentes al agua. Se pueden laminar y termoconformar, extruir en fibras, soplar, inyectar (Natureworks®):
  - Celulosa (Natureflex®).
  - Polihidroxialcanoatos PHA (Nodax®).
  - Polihidroxibutiratos PHB (Biopol).

También hay un desarrollo de plástico biodegradable a partir de recursos fósiles, Ecoflex®.

La biodegradabilidad es consecuencia de la estructura química del polímero, no de su fuente de obtención, pero lógicamente el mayor beneficio medioambiental se da en los polímeros obtenidos de fuentes renovables.

El objetivo de que un plástico de gran consumo y uso efímero sea compostable principalmente es poder valorizar la gran cantidad de envases y embalajes que se generan a nivel doméstico. Para ello su tasa de degradación ha de ser similar a la de la FORM (fracción orgánica de los residuos municipales) para poder ser procesado con ésta en las plantas de compostaje o de metanización.

Las características a controlar para poder considerar un plástico valorizable por medios biológicos son:

- *Composición química:* con especial atención en el contenido de metales pesados y COPs, puesto que afectan a la calidad posterior del compost.
- *Biodegradabilidad:* capacidad de ser degradado por microorganismos en un ambiente apropiado. Es un parámetro estandarizado y medible en el laboratorio.
- *Tasa de desintegración:* capacidad para que se fragmente.
- *Ecotoxicidad:* del material resultante del compostaje.

Los principales inconvenientes que encuentran los bioplásticos para su plena incorporación al mercado son los habituales de una nueva tecnología, son demasiado caros respecto a los convencionales puesto que su procesado no es tan masivo y no se han desarrollado completamente las adaptaciones necesarias de la maquinaria existente, no tienen aún un nicho de mercado ni estándares plenamente aceptados. La mayor dificultad, sin embargo, es conseguir materiales que ofrezcan la biodegradabilidad deseada y que a la vez cumplan todas las especificaciones técnicas necesarias para cada tipo de producto, puesto que en muchos casos ambas características son contrapuestas. Algunos plásticos como el PVC o plásticos técnicos difícilmente podrán ser sustituidos por bioplásticos o, en caso de serlo, los aditivos harán el compostaje inútil.

6.1. ÁCIDO POLILÁCTICO (PLA)

El ácido láctico (*ác. 2-hidroxipropiónico*) es un ácido orgánico débil fuertemente higroscópico debido a su estructura (grupo hidroxilo y carbonilo) que tiene tendencia a formar espontáneamente dímeros y polímeros. La temperatura de transición vítrea del PLA es 50-80 ℃ y la de fusión 130-1801 ℃. Puede producirse por:

- Síntesis química, pero este sistema genera mezclas racémicas de bajas propiedades ópticas para las posteriores aplicaciones industriales.
- Fermentación de sustratos ricos en carbohidratos en medio acuoso, lo que produce un PLA de alta pureza. Se pueden fermentar sustratos puros, como lactosa, glucosa, sacarosa, que producen un PLA de mayor pureza y por lo tanto sin tantas necesidades posteriores de purificación que encarecen el producto. También se puede obtener por fermentación de residuos ricos en hidratos de carbono de la industria alimentaria. En

la obtención por fermentación destaca la empresa Cargill Dow, que tiene una capacidad de producción de 140.000 t anuales a partir de almidón de maíz. La fermentación se produce con bacterias lácticas principalmente, pero también se puede realizar mediante el hongo *Rhizopus oryzae* o insertando en *Escherichia coli* los genes para producción de ácido láctico de las bacterias lácticas.

El principal problema de fabricación de ácido láctico por fermentación es la gran cantidad de productos no deseados que se obtienen junto a él y que obligan a una costosa purificación. Ello es debido a que a medida que se produce el ácido se disminuye el pH, lo que inhibe la acción bacteriana, por lo que se adicionan álcalis para mantener el pH neutro, provocando la formación de numerosas sales, lactatos. Posteriormente se debe desmineralizar el caldo de fermentación mediante ultrafiltración, ósmosis inversa, electrodiálisis o intercambio iónico. Finalmente, el ácido láctico se polimeriza para obtener PLA, que para uso industrial debe ser de alto peso molecular. Esto se consigue de manera óptima mediante el proceso ROP desarrollado por Cargill que consta de tres etapas: purificación, apertura y polimerización del anillo de lacturo.

6.2. POLIHIDROXIALCANOATOS (PHA)

Los PHA los generan de manera natural los azotobacter o *Alcaligenes eutrophus* (actualmente denominada *Ralstonia eutropha*), bacterias fijadoras de nitrógeno que fermentan los azúcares y, en ausencia de éstos, acumulan energía en forma de PHA. Tras cinco días de fermentación pueden llegar a acumular el 80% de su peso seco en forma de PHA.

La resina de PHA tiene un punto de fusión de 200 ℃ y puede ser procesada con la misma maquinaria que el PET sin necesidad de realizar ninguna adaptación, puede ser moldeado, inyectado, extruido y laminado. Tiene una gran resistencia al agua, cristalinidad y elevado punto de fusión, lo que lo convierte en el material de mayores aplicaciones potenciales en el mercado, aunque la biodegradabilidad está supeditada a realizar una hidrólisis previa.

El PHA es un término genérico que da nombre a una gran variedad de poliésteres, entre los que destacan el polihidroxibutirato (PHB) y el copolímero PHB-polihidroxivalerato (PHBV) por sus propiedades como sustituto del polipropileno.

Este biopolímero fue inicialmente desarrollado por ICI (Imperial Chemical Industries) durante la crisis del petróleo, pero el estudio fue abandonado cuando dejó de ser interesante económicamente. Posteriormente fue explotado por Monsanto y finalmente las patentes y el máximo desarrollo está siendo llevado a cabo ahora por Metabolix. Esta empresa investiga para desarrollar mediante ingeniería genética cepas bacterianas modificadas con una producción óptima de PHA.

La cantidad de PHB en las células es normalmente del 1-30% del peso seco, pero algunas de las especies de *Azotobacter* y *Ralstonia* pueden llegar a almacenar el 90%, con inclusiones más o menos esféricas de 0,5 μm de diámetro.

En función de las condiciones, el sustrato y las especies elegidas, se consiguen proporciones de HB/HV más adecuadas desde el punto de vista comercial en cuanto a propiedades termoplásticas y mecánicas. Por lo tanto, los microorganismos ya generan la mezcla, lo importante es controlar en qué proporción. La Figura 13.17 muestra los microorganismos que almacenan energía en forma de PHA.

Una vez los gránulos de PHA ha sido almacenado en las células, se deben romper las membranas de éstas para liberarlos sin provocar la despolimerización en el proceso. Se utilizan tres métodos: extracción con disolventes y recristalización, que es lento y caro pero con el que se obtiene un polímero de elevado peso molecular y elevada pureza; reacción química con hipoclorito de sodio, que disuelve la membrana celular pero interfiere con el polímero dejando restos de hipoclorito, lo que lo excluye por motivos medio-

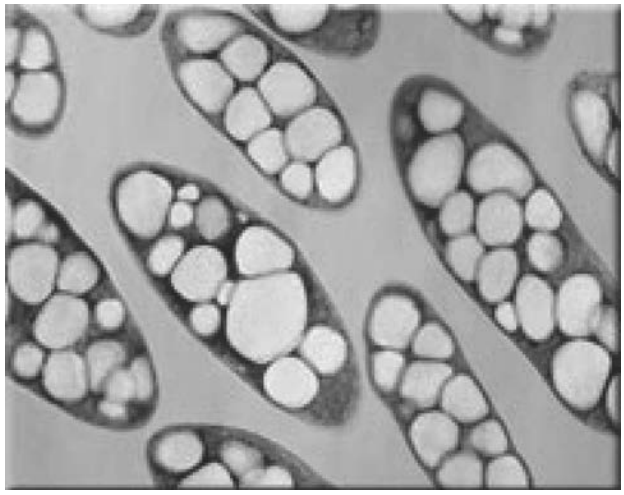


Figura 13.17. Acumulación de gránulos de PHA. Fuente: www.metabolix.com.

ambientales; digestión enzimática, que consiste en utilizar enzimas que debilitan la membrana celular que puede ser así destruida con ultrasonidos para liberar los gránulos y ser purificados por extracción con disolvente. Este es el sistema utilizado comercialmente en la actualidad.

La biodegradabilidad del PHA es consecuencia de su función, ya que son reservas de energía para las células, que pueden degradarlas en el momento que lo necesitan a CO_2 y H_2O. También se puede degradar térmicamente (250-300 ℃) y por hidrólisis. La degradación en el medio ambiente se daría por el ataque superficial de las diversas bacterias y hongos presentes en el medio, que segregan enzimas al exterior capaces de despolimerizar el PHA, y posteriormente los dímeros serían a su vez absorbidos por los microorganismos y degradados. Para retrasar la degradación de los productos uno de los sistemas consiste en tratar superficialmente el polímero térmicamente para eliminar poros que faciliten la colonización bacteriana.

Diversos experimentos han mostrado que un film de PHBV (50 μm) perdió un 50% del carbono en forma de CO_2 a los 16 días enterrado en un suelo húmedo, se degradó totalmente en 1-2 semanas en agua residual en condiciones anaerobias, 7 semanas en condiciones aerobias, 10 semanas en el suelo y 15 en agua de mar. El PHBV no se degrada en aire húmedo.

El PHB Es un material termoplástico semejante en su comportamiento con el polipropileno, aunque más frágil y rígido. Esto se puede mejorar tratando el producto con un rodillo calefactor, aunque sólo en aquellos productos que lo permitan, como filmes.

Es cinco veces menos permeable al CO_2 que el PET, lo que lo convierte en un material óptimo para envase alimentario.

Todas estas propiedades pueden mejorar en función del grado de copolimerización con HV. El coste de producción está ligado al coste del sustrato y a la eficiencia de su conversión, como muestra la Tabla 13.10.

Diversas universidades europeas desarrollan estudios de producción de PHA en los microorganismos presentes en los tratamientos de aguas residuales en los que se produce alternancia entre las condiciones aerobias y anaerobias. Parece ser que los fangos activados tienen una capacidad y velocidad de almacenamiento de PHB comparables a las de los cultivos de una sola especie bacteriana. Sin duda este sería un avance muy interesante, puesto que no sólo se abarataría enormemente el precio de partida del sustrato sino que a la vez se estaría tratando un residuo.

Tabla 13.10. Coste-eficiencia de los diferentes sustratos

Sustrato	€/t sustrato	Rendimiento PHB/sustrato	€/t PHB
Lactosa (suero lácteo)	56,8	0,33	172
Melazas de caña de azúcar	176	0,42	419,2
Etanol	401,6	0,5	804
Metanol	147,2	0,18	816
Glucosa	394,4	0,33	1.196
Ácido acético	564	0,33	1.708

Las aplicaciones del PHB más destacables, además de aquellas típicas en las que se usaría el PP (envases de jabones, fiambreras/contenedores varios, bolsas, etc.), son las de barrera para alimentos (film y envases de alimentación de todo tipo, *brics*) y las aplicaciones médicas, puesto que es mucho más compatible con los tejidos vivos (polvo lubricante de guantes, cápsulas de lenta liberación de los medicamentos, ropa de quirófano, aplicaciones internas).

6.3. OTROS BIOPOLÍMEROS

- *Almidón:* La deficiencia de las resinas termoplásticos de almidón, además de su elevado precio, es la poca resistencia al agua a temperaturas superiores a la ambiental (máximo 80% humedad). Para corregirlo, se puede mezclar con otras resinas biodegradables o convencionales.
- *Mezclas:* Es el caso de Ecovio®, elaborado a partir de un 45% de PLA y Ecoflex®, una resina biodegradable de origen fósil.

Para potenciar la destrucción de algunos productos una vez depositados en el vertedero se le añaden polímeros biodegradables como carga o relleno. Esta fue la primera estrategia para conseguir plásticos biodegradables. De esta manera cuando el producto, como el film agrícola, está en contacto con las condiciones del vertedero las partes biodegradables inician su degradación y desaparecen, esponjando el material no biodegradable que queda más expuesto a la oxidación y se disgrega más fácilmente. Este sistema no hace más biodegradable el plástico, simplemente lo disgrega más fácilmente pero si el polímero, por sus características técnicas, es muy resistente a la oxidación tan solo se habrá conseguido disgregar el residuo.

Toda sustitución de materia prima fósil por otra de origen renovable es positiva, pero no implica que sea biodegradable. Hay muchas aplicaciones y desarrollos en fase de pruebas que surgen en este sentido, pero finalmente es el propio mercado el que decidirá el grado de éxito. La Universidad Politécnica de Valencia (España) ha propuesto el uso de los residuos de cáscara de almendra molidos como carga que junto a polvo de PVC y un plastificante biodegradable ofrecen un plastisol que puede ser centrifugado para elaboración de piezas por rotomoldeo, como tiradores y accesorios de muebles o juguetes con un aspecto similar a la madera aglomerada. Esto disminuye el coste de la pieza por usar residuos y el producto será al final de su vida útil parcialmente degradable.

6.4. LOS BIOPLÁSTICOS Y SU FUTURO COMO FRACCIÓN DE RESIDUOS

Las Directivas de envases y residuos de envases (94/62/EC y 2004/12/EC) contemplan la autodeclaración de las empresas como un mecanismo de certificar la composición o características de los materiales usados en los envases. Este mecanismo, aunque aceptado y controlado, puesto que cualquier empresa que se atenga a este sistema acepta que puedan inspeccionarla para comprobar lo que ha declarado, se considera insuficiente. Ante los consumidores, lo que una empresa declare en sus envases es poco relevante, en cambio un distintivo oficial igual para todos los materiales biodegradables se percibe mucho más serio.

Por este motivo diferentes instituciones de varios países crearon la Red Internacional de Certificación de la Compostabilidad (www.iccn.org), que cuenta con la participación de la DIN CERTCO europea o el *Biodegradable Products Institute* americano, entre otros. Esta red de instituciones ofrece información y la posibilidad de certificar productos con su logotipo.

Así, se define un producto plástico como biodegradable si en el plazo máximo de 180 días el 60% como mínimo de la masa del polímero se descompone en CO_2 y H_2O o bien el 90% en caso de ser materiales compuestos, sin dejar más del 10% en peso de residuos después de 12 días de iniciarse el proceso de compostaje; además, los productos de la degradación no serán tóxicos.

Una de las ventajas de poder identificar claramente un plástico compostable es que los consumidores puedan reciclarlo por la vía apropiada, ya que en los casos de las bolsas de basura no hay error posible pero no así con las nuevas aplicaciones como la vajilla desechable o las botellas de agua. Actualmente no está desarrollado todo el potencial de los bioplásticos y la recogida selectiva todavía está evolucionando para poder adaptarse a las condiciones específicas de cada región y sus usos y costumbres para logra la máxima eficiencia en el reciclado. Por ejemplo, actualmente no hay un mecanismo aparte del SIG o SDDR, por lo que un envase por ley tendría que pagar, independientemente de que el material sea bioplástico o petroplástico. En el futuro, pues, es previsible asistir a cambios en estos aspectos.

Actualmente se ha formado la asociación *European Bioplastics* a partir de la ampliación de la Asociación Internacional de fabricantes de productos biodegradables (IBAW, alemana). Esta asociación define los bioplásticos como aquellos polímeros biodegradables (que cumplen la norma EN*13432*, independientemente de que sean de origen fósil o no) y aquellos polímeros no biodegradables que provienen de vegetales y cultivos.

En España el Instituto Tecnológico del Plástico (AIMPLAS) coordina la red tecnológica para España, Portugal e Iberoamérica de reciente creación SUSCompNET Ibérica en la que colaboran diversas universidades y empresas. Esta red, integrada en la homónima europea, pretende impulsar el desarrollo y la implantación de los plásticos biodegradables.

Desde la UE se impulsa la investigación en bioplásticos para minimizar el impacto de estos residuos. El proyecto PICUS, en el que participan diversos países con Centros Tecnológicos (España mediante AIMPLAS) y pyme's, promueve la investigación de materiales que puedan sustituir el de las cuerdas plásticas usadas en agricultura y las redes de embalaje ligero (patatas, naranjas).

Bibliografía

ALEGRE, J. M. El reciclado mecánico de materiales plásticos en España. *Revista Residuos,* Vol. 68 (2001).

AMERICAN PLASTICS COUNCIL. *Understanding plastic film* (diciembre, 1996).

ANARPLA. *Estudio técnico-comercial para la difusión y el fomento del uso y aplicaciones de la granza reciclada de plástico* (1999).

APME. *An analysis of plastics consumption and recovery in Europe*. Summer (2004).

APME. *Report for the European Centre for Plastics in the Environment.* Impacto de la producción de diversos plásticos (2004).

BELLO, D. Los polilactatos y los materiales plásticos biodegradables. *Revista Ingeniería Química* (febrero, 2006).

CARRASCO, F. Los polihidroxialcanoatos. *Revista Ingeniería Química* (junio, 2004).

CER, CICLOPLAST. *Conferencia Internacional sobre innovación en la valorización de los residuos plásticos* (noviembre, 2000).

DAVIDENKO, N. Polímeros verdes, utopía o realidad. *Revista de Plásticos Modernos*. Vol. 83 (junio, 2002).

DETZEL, A. *et al*. Refillables or one way? *Waste Management World Magazine* (julio-agosto, 2005).

DÍAZ, T. *et al*. Los filmes plásticos en la producción agrícola. *Mundiprensa-Repsol YPF* (2001).

ELIAS, X. Posibilidades de la pirólisis en el tratamiento de residuos. *Revista Residuos*, 68 (2002).

GARCÍA, A. Procesos de transformación y principales aplicaciones de las fibras de polipropileno y polietileno. *Revista de Plásticos Modernos*. Vol. 90 (diciembre, 2005)

HORCAJADA, D. *El EPS en el envase y embalaje: el material, sus aplicaciones y radiografía del sector en España*.

ICSG. *Information circular on waste electric and electronic equipment (WEEE)* (mayo, 2003).

LÓPEZ , D. Situación y perspectivas de los polímeros biodegradables. *Revista Ingeniería Química* (mayo, 2005).

MARCILLA, A. *et al.* Reciclado terciario de plásticos vía pirólisis. *Revista de Plásticos Modernos.* Vol. 79 (mayo, 2000).

MATEO, J. L. La diversidad, característica singular y determinante de los materiales poliméricos. *Revista de Plásticos Modernos.* Vol. 89 (mayo 2005).

MATERO, J. L. Reciclado de PET: reciclado químico. *Revista de Plásticos Modernos.* Vol. 86 (diciembre, 2003)

MIGUEL, R. *et al*. Reciclado de soportes de almacenamiento óptico. *Revista Residuos.* Vol. 70 (2002).

MIGANJOS, C. Hechos, cifras y nuevas oportunidades del policloruro de vinilo. *Revista de Plásticos Modernos.* Vol. 87 (enero 2004).

MONCEL, C. *Aditifs plastiques: quel impact environnemental? Recyclage Récupération Magazine*, Vol. 7 (febrero, 2003).

PARREÑ , A. El reciclado de plásticos en España. *Revista Residuos* (junio, 2004).

RECOLETOS. *Conferencia Valorización de Residuos* (septiembre, 2003).

REINECKE, H. Aspectos ecológicos del PVC: un análisis objetivo. *Revista de Plásticos Modernos.* Vol. 87 (febrero, 2004).

Revista de Plásticos Modernos. Vols. 80 y 84. (septiembre, 2000 y mayo, 2004). *Monográficos sobre polímeros en agricultura.*

www.suscompnetiberica.com
www.ict.fraunhofer.de
www.vinyl2010.org
www.lotfi.net
www.fundacionentorno.org/noticias
www.isrcer.org/noticias
www.itdg.org
www.aimplas.es
www.basell.com
www.apme.org
www.anape.org

Reciclaje y tratamiento de residuos diversos

14

Ramón Altadill, Ana Andrés, Aina Bruno, Jordi Bruno, Amparo Cortés, Gloria Díez, Xavier Elias, Fructuos Mañá, Enric Ripoll

ÍNDICE

1. Reciclaje de aparatos electrodomésticos, transformadores y cables 1035
1.1. Los electrodomésticos 1035
1.2. Reciclaje de conductores eléctricos 1035
1.3. Transformadores eléctricos 1036
1.4. Investigación respecto a la gestión de bombillas de Hg de descarga a alta presión 1037
1.5. Teléfonos móviles 1041
2. RAEE. Tratamiento de aparatos eléctricos y electrónicos 1042
2.1. Gestión y tratamiento de RAEE's 1042
2.2. Sistemas de reciclaje 1045
2.3. Reciclaje de equipos que contienen pantallas 1051
2.4. Reciclaje del resto de aparatos eléctricos y electrónicos 1051
2.5. Reciclaje de circuitos impresos 1054
2.6. Impacto ambiental de los equipos y maquinaria de oficina 1054
3. Reciclaje y tratamiento de pilas y baterías de potencia 1055
3.1. Clasificación de pilas 1055
3.2. La recuperación del mercurio 1059
3.3. Baterías de automoción 1060
4. Tratamiento de vehículos fuera de uso (VFU) 1061
4.1. Previsible evolución técnica y ambiental del automóvil 1063
4.2. Separadores de metales 1071
4.3. Vehículos fuera de uso 1073
4.4. Los catalizadores agotados 1077
4.5. Valorización energética de los residuos de VFU 1078
5. Valorización de neumáticos fuera de uso 1080
5.1. Composición y características de los neumáticos 1080
5.2. Reciclaje de neumáticos 1081
5.3. Valorización de neumáticos usados 1083
6. La problemática de los diversos tipos de aceites minerales residuales 1087
6.1. Regeneración por destilación 1088
6.2. Regeneración total 1089
6.3. La valorización energética de los aceites 1089
6.4. Resumen de la gestión en España 1090
6.5. Reseña sobre el análisis de ciclo de vida de los aceites 1090
6.6. Reprocesamiento para otros fines 1091
7. Reciclaje de residuos de la construcción y de la deconstrucción 1091
7.1. El reciclaje en la construcción 1091
7.2. Historia del tratamiento de los RDC 1094
7.3. Perspectivas actuales en el reciclaje de RDC 1098
7.4. Residuos de construcción 1100
7.5. Aspectos peligrosos de la demolición. El amianto 1102
7.6. El reciclado de los materiales procedentes de derribo 1103
7.7. Campos de aplicación de los áridos reciclados 1104
7.8. Material reciclado para subbases 1105
7.9. Maquinaria para la trituración de los residuos de demolición 1105
8. Posibilidades de recuperación de suelos contaminados 1107
8.1. Elementos para la confección de vertederos 1107
8.2. El vertido de residuos visto desde el punto de vista de los posibles suelos contaminados 1111
8.3. Suelos contaminados: posibilidades de valorización 1115

9. La problemática y el futuro de los polvos de acería 1138
9.1. Características de los polvos de acería.... 1138
9.2. Gestión de los polvos de acería..... 1140
9.3. Recuperación de Zn y Pb. El sistema Waelz..... 1141
10. Gestión y tratamiento de los residuos radioactivos de alta actividad 1144
10.1. Evolución de la demanda energética en la unión europea..... 1144
10.2. Proyección de la oferta energética en la unión europea..... 1146
10.3. Residuos radioactivos 1147
10.4. Almacenamiento geológico profundo (AGP)..... 1149
Bibliografía 1153

RESUMEN

Este último capítulo se ha concebido a base de incorporar toda una serie de residuos que, sin ninguna relación entre ellos, tradicionalmente, no tenían otra solución que el vertido, previo paso obligado por un tratamiento mas o menos complejo. Sin embargo, hoy en día se apuntan vías de valorización para casi todos ellos.

La primera parte lo constituyen unos residuos de nueva aparición: los relacionados con la electricidad y sobre todo con la electrónica de consumo, puesto que hoy en día tienen una gran importancia y suponen un verdadero peligro.

El segundo grupo lo integran los residuos derivados de la automoción, con una problemática similar a los anteriormente citados pero generados en cantidades infinitamente mayores.

El tercer grupo se compone de los residuos de la construcción y los suelos contaminados, haciendo una incursión por la problemática de los vertederos tan ligado a estos últimos.

El capítulo, y la obra, se cierra con una exposición de los residuos radioactivos de alta actividad, desde el punto de vista del tratamiento y de forma complementaria a como se abordó en el Capítulo 7.

1. Reciclaje de aparatos electrodomésticos. Transformadores y cables

Los aparatos eléctricos y electrónicos forman, cada vez más, parte de nuestra vida cotidiana. Además tienen una obsolescencia rápida, lo que se traduce en una gran generación de residuos. Este primer apartado hace referencia a los residuos de aparatos e instrumentos, básicamente eléctricos, si bien actualmente, siempre hay una parte electrónica en ellos, por lo que es difícil de establecer una frontera entre ambos.

1.1. LOS ELECTRODOMÉSTICOS

La Figura 14.1 muestra el esquema general de tratamiento del residuo, comúnmente, denominado chatarra electrónica. La primera fase de todo proceso consiste en la separación exhaustiva de todos los componentes potencialmente peligrosos: condensadores, circuitos impresos, plásticos que contengan PCB's, relés de mercurio, amiantos, acumuladores de Ni/Cd, etc.

Recibe el nombre genérico de chatarra electrónica el residuo de la «línea marrón» fuera de uso integrada por televisores, radios, teléfonos, videos. Estos materiales están formados por componentes de diversa naturaleza pero tienen en común el hecho de contener compuestos altamente contaminantes, en particular los ordenadores y los receptores de televisión.

La composición media de estos residuos, aparece en la Tabla 14.1.

1.2. RECICLAJE DE CONDUCTORES ELÉCTRICOS

Un país de tamaño medio, como los Países Bajos, puede llegar a generar 60.000 t/año de residuos de conductores eléctricos. Por término medio el contenido en metales (Cu, Al, Pb, y Fe) en estos residuos es del 70-80% en peso, mientras que el aislante de plástico puede ser el 30-50%.

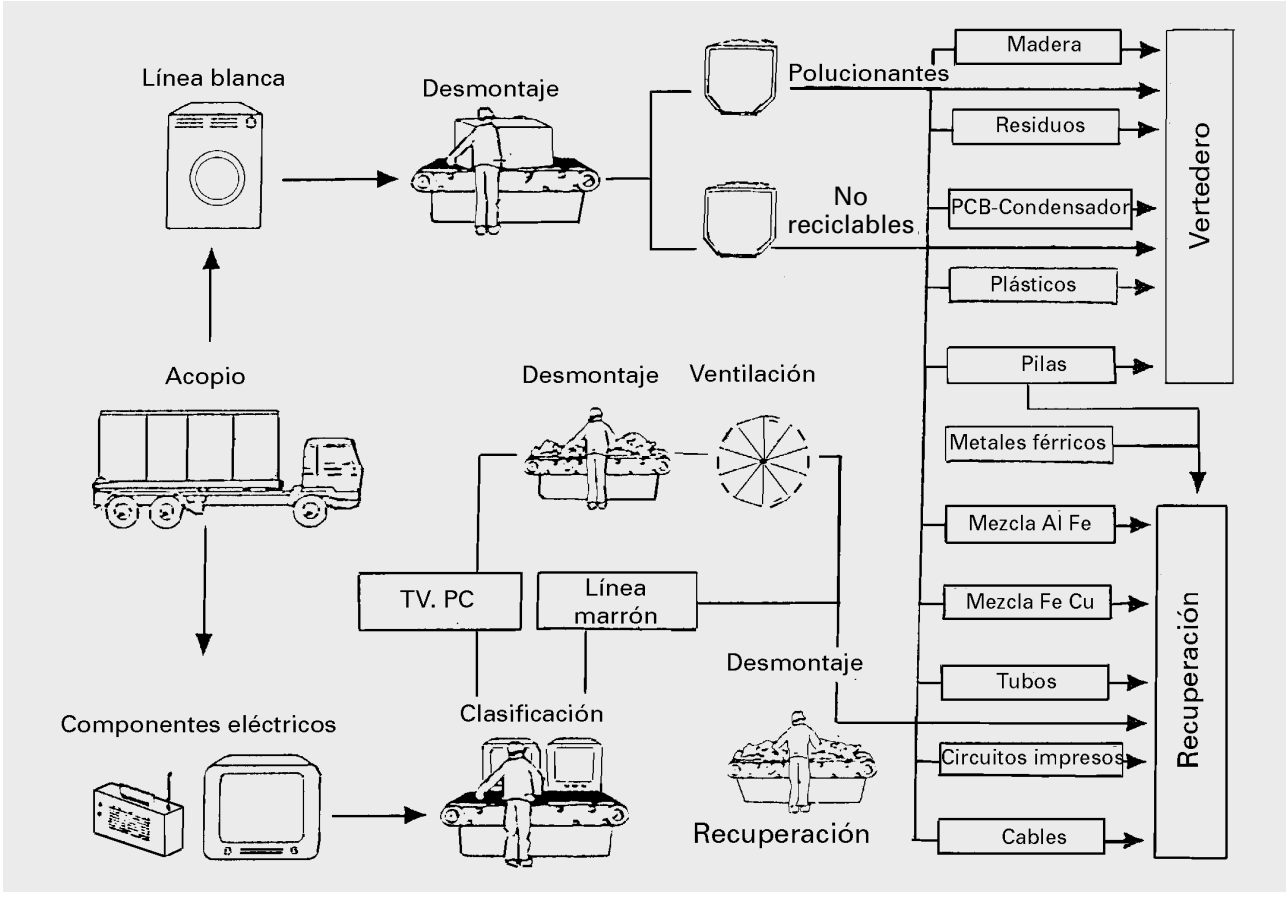


Figura 14.1. Tratamiento de chatarra electrónica.

Tabla 14.1. Composición media de la chatarra electrónica

Material-Residuo	% en peso
Tubos (pantallas)	28,3
Metales férreos	22,0
Circuitos impresos	11,3
Plásticos	6,7
Maderas	6,7
Cables	1,6
Accesorios	1,6
Mezclas hierro-cobre	1,2
Condensadores	1,1
Mezclas hierro-aluminio	1,1
Componentes conteniendo metales preciosos	1,0
Otros	17,4

El sistema antiguo de recuperación del Cu, consistía en incinerar el conductor. Ello era un sistema muy contaminante por cuanto el plástico se destruía en malas condiciones y, a estas temperaturas, el Pb fundía y se vaporizaba con lo que aumentaba la contaminación. En el caso de los conductores de aluminio la incineración no puede ni plantearse ya que el Al se oxida directamente a alúmina e invalida la recuperación del metal.

En la actualidad coexisten dos sistemas de reciclaje:

- La cizalla (*stripping*, o cortado en tiras).
- La trituración criogénica.

En el primer caso la máquina, como la representada en la Figura 14.2, separa el aislante del metal. En el caso de los cables de cobre la tasa de recuperación, empleando esta tecnología, es del 99%, y en los conductores de plomo del 98%.

La inserción del conductor en nitrógeno líquido transforma el aislante en material quebradizo y la trituración es muy fácil. La separación se realiza por diferencias de densidad o aprovechando las propiedades de conductividad o magnéticas de los metales.

El aislante también puede reciclarse. La composición media de ellos es: 75% PVC, 20% PE y un 5% de metal residual. La separación de los tipos de plásticos se lleva a cabo por sistemas convencionales.

En el DVD adjunto, en el punto 1, se muestra información complementaria sobre el reciclaje de cables eléctricos.

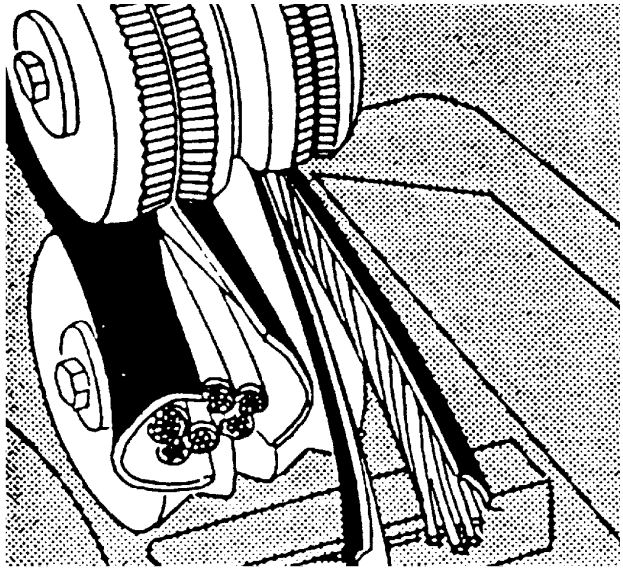


Figura 14.2. Separador cable/metal.

1.3. TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS

El aceite empleado en los transformadores eléctricos tiene una doble misión:

- Evacuar el calor engendrado en el núcleo de los bobinados hasta la zona de disipación.
- Aislar las zonas a diferentes potenciales eléctricos, interponiendo una barrera entre ellas.

Estos requisitos condicionan las características del aceite que, esencialmente debe tener una gran estabilidad química a temperaturas relativamente elevadas. Es por ello que, tradicionalmente, se ha añadido compuestos que contienen PCB's a las formulaciones (como askareles).

Una vez fuera de uso, los transformadores eléctricos constituyen un peligro debido a que el aceite que lleva en su interior contiene una notable cantidad de PCB's (policloro bifenilos), sustancias organocloradas altamente tóxicas, que se han usado debido a su alto poder dieléctrico y propiedades termodinámicas.

El proceso normal de reciclado consiste en vaciar el líquido, comprobar si contiene PCB's, limpiar el interior y tratar la carcasa. En cuanto al aceite ha de envasarse y enviarlo a una incineradora de residuos industriales. En la cámara de postcombustión de la incineradora los aceites que contienen PCB's deben tratarse a una temperatura mínima de 1.200 °C con un tiempo de residencia de 2 segundos.

Algunas acerías están autorizadas a quemar este tipo de aceite debido a que sus hornos trabajan a una temperatura muy superior a los 1.200 °C.

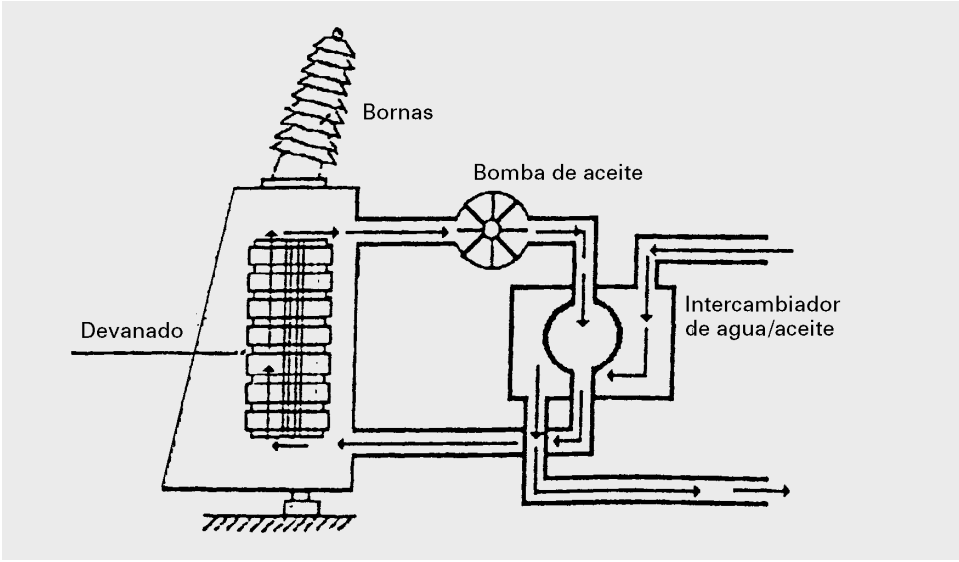


Figura 14.3. Refrigeración forzada de aceite y agua.

La Figura 14.3 muestra el principio de funcionamiento del sistema de refrigeración alternativo de los transformadores eléctricos.

1.4. INVESTIGACIÓN RESPECTO A LA GESTIÓN DE BOMBILLAS DE Hg DE DESCARGA A ALTA PRESIÓN

Para los residuos provenientes de los sistemas de iluminación, se debe considerar, en principio, que salvo que se trate de una obra importante de renovación en masa, la generación de estos ítems resulta dispersa, aleatoria y de pequeña escala.

Las bombillas de incandescencia poco han variado desde que el siglo XIX Edison las inventó. Las bombillas tienen una tasa de conversión de energía eléctrica en luz que oscila del 5% al 15%, en realidad lo que producen es calor. Las modernas bombillas de bajo consumo pueden ahorrar hasta un 80% de energía y tienen una vida doce veces mayor. Tan solo en España, la iluminación de los hogares representa el 4% del consumo nacional de energía eléctrica y el 20% del consumo eléctrico del hogar. En 2007, Philips ha sacado al mercado una nueva gama de tubos fluorescentes (los TL) que ahorran un 10% más de energía. En comparación con los tubos estandard, cada lámpara ahorrará 10 kg de CO_2 al año.

Para su reciclaje es preciso separar el vidrio del filamento y la base, ya que se trata de tres materiales incompatible de cara al reciclaje.

Las lámparas ofrecen a una situación conflictiva. Por un lado, el vidrio de lámparas se considera contaminante en los procesos de reciclado convencionales, es decir, la típica selección de vidrios de acuerdo a su color (blanco, ámbar, verde).

Por otro lado, las lámparas de mercurio a alta presión, las de sodio a alta presión, las de halogenuros metálicos, y las fluorescentes, contienen mercurio (Hg) que es altamente tóxico por absorción cutánea e inhalación de vapor, y porque a largo plazo es neurotóxico y puede causar defectos congénitos.

1.4.1. Experiencias internacionales en el reciclaje de lámparas

La compañía Osram Sylvania, a principio de la década de 1980 desarrolló un proceso para lámparas fluorescentes que aumentó, a través de los años, la tasa de reciclaje del 90 al 93% en peso. En Alemania, las compañías de disposición de residuos y varias fábricas de lámparas fundaron el *Lamp Recicling Working Group* y, a partir de ahí, se recuperan materiales secundarios de la corriente de residuos y se los utiliza en la producción de nuevas lámparas.

Debido a que las lámparas difieren en diseño y contenido de materiales, por mucho tiempo resultó imposible un reciclaje completo. Actualmente un nuevo desarrollo permite el reciclaje de todo tipo de lámparas (vapor de sodio de alta presión, lámparas de vapor de mercurio, lámparas de halogenuros metálicos). En dicho proceso los vidrios rotos y el residuo metálico, que no pueden ser vueltos a la alimentación de la producción, son convertidos en vidrio o, mediante un proceso especial, en «*foam glass*». Este material, que es muy buen aislante térmico, fuerte, impermeable al agua y de bajo peso

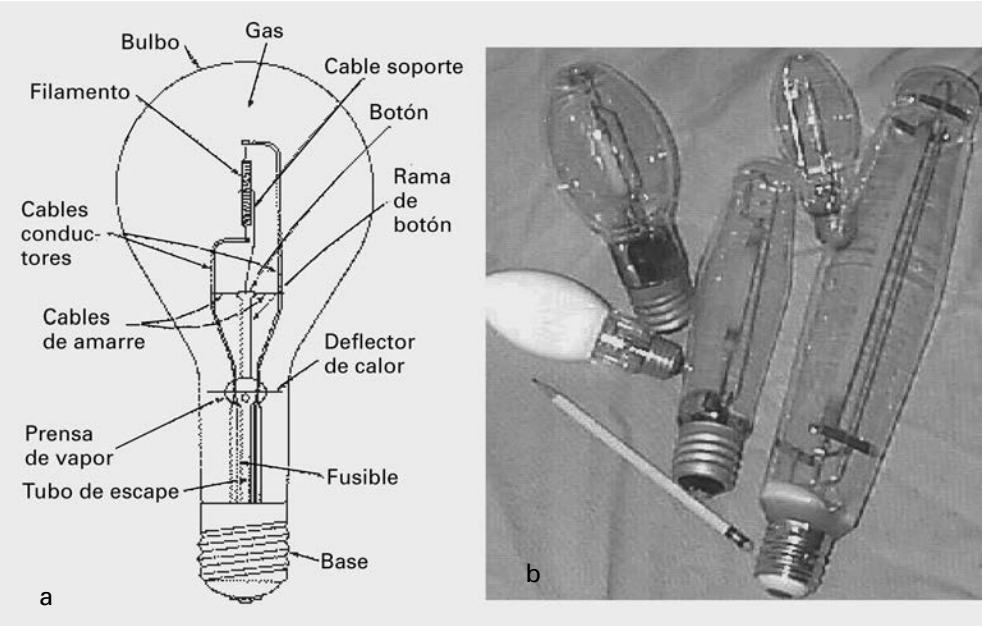


Figura 14.4. Lámparas de incandescencia (a) y descarga de gas (b).

específico, puede ser usado para techos en edificaciones, sistemas de drenajes o como aislante.

Un dato muy interesante es que a partir del reciclado de uno de sus modelos de lámparas, la empresa Osram logra no solo reciclar el 100% del vidrio y del aluminio, sino también del fósforo, logrando así reducir a la mitad el consumo de energía que demanda la producción de este elemento.

1.4.2. Características técnicas de las lámparas de alumbrado

Las lámparas de alumbrado, como indica la Figura 14.4, pueden clasificarse de acuerdo al principio de funcionamiento. Como puede observarse en el esquema siguiente, tenemos las lámparas de incandescencia y las lámparas de descarga a gas.

En el grupo de lámparas de descarga de gas a baja presión, destacan los tubos fluorescentes y en el grupo de las lámparas de descarga de gas a alta presión las de vapor de mercurio (LVMAP). Para diseñar adecuadamente el tipo de gestión para las últimas, es absolutamente necesario analizar su proceso de funcionamiento.

En las lámparas descarga de gas se establece un arco voltaico que excita los átomos de un gas. Éstos, al volver a su nivel de energía original, emiten un fotón.

Como muestra la Figura 14.5, los fotones emitidos pueden corresponder a una longitud de onda visible o más corta (UV), en cuyo caso se recubre el interior de la lámpara con fósforo para convertirlos en luz visible.

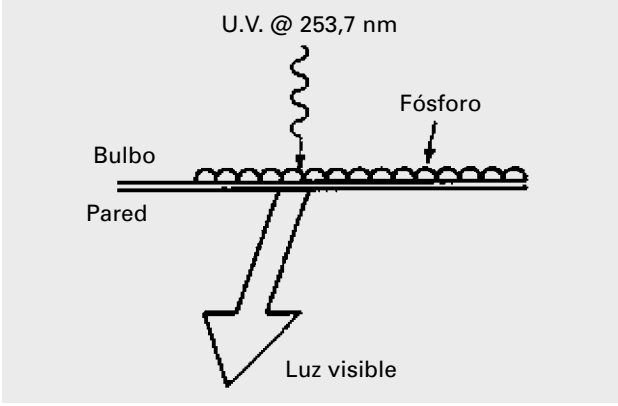


Figura 14.5. Emisión de radiación UV en lámparas de descarga de gas.

Las lámparas de descarga exigen el uso de balastos, dispositivos que proporcionan la tensión inicial de establecimiento del arco y limitan la corriente.

1.4.3. Lámparas descarga de gas a baja presión

En ellas, el interior de la lámpara se encuentra a una presión inferior a la atmosférica. Para ello, se hace el vacío y se deposita una pequeña cantidad de un material, como mercurio, kriptón, sodio, etc., que se vaporiza por la baja presión reinante.

Hay dos tipos de lámparas descarga de gas a baja presión: las fluorescentes (ver en Figura 14.6 el sistema de recogida de tubos fluorescentes) y las de vapor de sodio. Las primeras constan de dos electrodos (cátodos)

Figura 14.6. Lámparas fluorescentes.

que suelen estar a alta temperatura (unos 900 °C) al objeto de emitir fácilmente electrones, aunque también existen fluorescentes de cátodo frío (unos 150 °C).

En las fluorescentes, como muestra la Figura 14.7, el mercurio vaporizado emite radiación ultravioleta. Una pequeña cantidad de un gas noble, cuyos átomos se ionizan, mejorando la conductividad del conjunto. La luz visible se consigue por la acción del fósforo que recubre interiormente la pared de la lámpara. Dependiendo de la mezcla de fósforos, se consigue un espectro de emisión u otro.

En las lámparas de sodio, el gas a baja presión (aprox. 0,001 mm de Hg) unido a gases nobles para facilitar el arco, emite directamente radiación visible, sin necesidad de fósforo. El rendimiento luminoso es el máximo de todas las lámparas conocidas y, aunque decrece con el tiempo de uso, como en todas las lámparas, curiosamente su luminosidad aumenta (aunque menos que su consumo, evidentemente). Su vida útil alcanza las 18.000 horas, cifra similar a la de algunos fluorescentes.

1.4.4. Lámparas descarga de gas a alta presión

En este tipo de lámparas el interior se halla a una presión de gas superior a la atmosférica. Los tres tipos de lámparas con esta característica son: las de vapor de mercurio, las de haluros metálicos y las de sodio de alta presión.

En el interior del tubo de descarga existe una mezcla de vapor de sodio o mercurio y un gas inerte de relleno. El primero determina las propiedades de la luz de la lámpara y es el responsable de la emisión de la luz como consecuencia de la descarga. El segundo, el gas inerte, cumple varias funciones. La principal es disminuir la tensión de ruptura necesaria para ionizar el gas que rellena el tubo e iniciar así la descarga más fácilmente. Otra misión consiste en limitar la corriente de electrones y servir de aislante térmico para ayudar a mantener la temperatura de trabajo de la lámpara.

Las lámparas de vapor de mercurio a alta presión (LVMAP), como la representada en la Figura 14.8, constan de un tubo de cuarzo (para dejar pasar la luz UV) lleno de mercurio y pequeñas cantidades de gases nobles a una presión de entre 1 y 10 atmósferas. En las lámparas de vapor de mercurio se generan las longitudes de onda típicas del mercurio (404,7 nm, 435,8 nm, 546,1 nm y 577,9 nm), más energía ultravioleta.

Las lámparas de mercurio se completan con un envoltorio externo recubierto interiormente de fósforo, que convierte la fracción de energía ultravioleta generada en luz visible. En la Tabla 14.2 se resume la composición de este tipo de lámpara:

El principal componente peligroso de ésta lámpara es el mercurio, sustancia que puede lixiviar fácilmente desde el suelo hasta el agua subterránea, y de allí migrar a las corrientes y ríos. De acuerdo con datos de la USEPA, en el año 1989 se descargaron 643.000 kg de mercurio en los vertederos municipales de los Estados Unidos, y de ellos el 84% fue enterrado en el suelo.

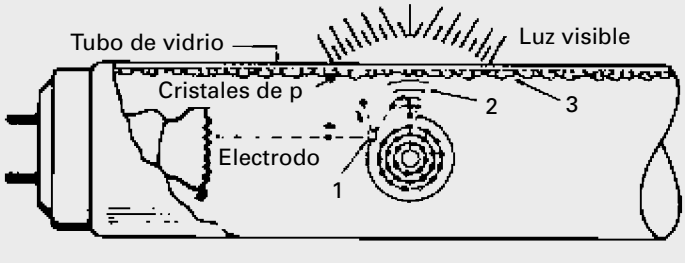


Figura 14.7. Funcionamiento de una lámpara fluorescente.

Tabla 14.2. Composición de las lámparas LVMAP.

Clasificación	Producción de luz	Ampolla		Tubo de descarga		
LVMAP	Luminiscencia	Material	Relleno	Material	Relleno	Electrodos
		Vidrio resistente a cambios de temperatura,con recubrimiento interior de vanadato de ltrio	Nitrógeno, argón	Cuarzo	Mercurio, argón	Volframio impregnado con material emisor de electrones, oxido de torio

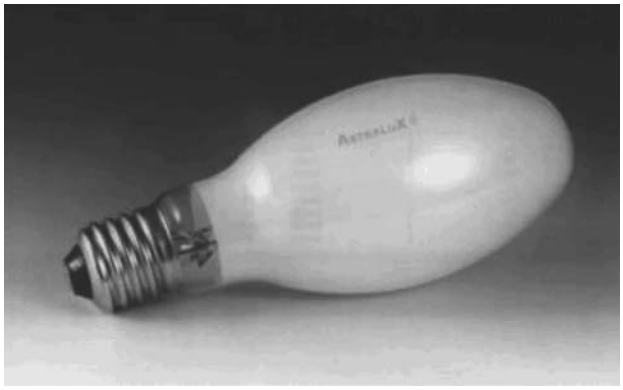


Figura 14.8. Lámpara LVMAP.

1.4.5. Lámparas fluorescentes como fuente de mercurio

La USEPA estima que son descargadas cada año cerca de 600 millones de lámparas fluorescentes. La cantidad de mercurio en las lámparas fluorescentes depende del tipo de lámpara y de la fecha de fabricación. Por ejemplo las lámparas T-12 con un diámetro de 38 mm contienen mayor cantidad de mercurio que las lámparas T-8, que poseen 25 mm de diámetro. Igual sucede con la época de fabricación de lámpara, por ejemplo las lámparas fluorescentes T-12 usadas hoy en día poseen entre 20 y 60 mg mientras que anteriormente contenían mas de 80 mg. de Hg.

Los nuevos diseños contienen en promedio 22,8 mg de mercurio. Las lámparas Philips han reducido sus contenidos a menos de 14 mg. Y las lámparas fluorescentes compactas CFL, pueden llegar a contener solo 4 mg.

Con el tiempo, parte del mercurio migra hacia la cubierta interna de material fluorescente, el vidrio y los electrodos de aluminio ubicados en los extremos de la lámpara. Para remover de manera segura el mercurio de las lámparas fluorescentes y de vapor a alta presión (LVMAP) desgastadas y prevenir la liberación del mercurio al ambiente, se requiere que las lámparas sean reprocesadas cuidadosamente y así poder reciclar completamente las lámparas.

Como medida de precaución, la USEPA recomienda ventilar bien la zona cuando sucede la ruptura casual e incontrolada de una lámpara de Hg.

1.4.6. Manejo de lámparas de mercurio según USEPA

En los EE UU, inicialmente las lámparas que contenían mercurio y plomo no fueron incluidas en la UWR (*Universal West Rule*), sin embargo luego se estableció que los usuarios disponían, en promedio, de 350 lámparas por mes en la mayoría de los estados, razón por la cual fueron incluidas.

La UWR incluye lámparas fluorescentes, lámparas de descarga, de neón, de vapor de mercurio, de alta presión con sodio y de haluros metálicos. La cantidad de lámparas que produzca el generador permite clasificar a los últimos. Según UWR, existen dos tipos de generadores:

1. Generadores de residuos a pequeña escala que producen menos de 5.000 kilos por mes de estos tipos de residuos combinados, incluyendo baterías, desechos de pesticidas, termostatos y lámparas. Esto es equivalente a 17.000 lámparas fluorescentes tipo T-12 o a 26.000 lámparas tipo T-8. Estos residuos pueden almacenarse hasta un mes y no requieren registros de envíos. Además no precisan estar inscritos ante la USEPA. Solo deben mantener informados a los empleados sobre su manejo seguro y tener un plan de contingencia ante emergencias.
2. Generadores de residuos a gran escala que producen mas de 5.000 kilos por mes de residuos combinados, incluyendo baterías, desechos de pesticidas, termostatos y lámparas. Esto es equivalente a 17.000 lámparas fluorescentes tipo T-12 o a 26.000 lámparas tipo T-8.
   Estos residuos pueden almacenarse durante un año, requieren registros de envíos hasta tres años. Además tienen que ser inscritos en la USEPA y notificar todas las actividades relacionadas con el manejo

1.4.7. Sistemas de disposición final

Para la disposición final, UWR permite la destrucción de las lámparas solo bajo un sistema cerrado que permita capturar y recuperar el mercurio liberado durante el tratamiento. En el estado de Wisconsin, por ejemplo, el departamento de recursos naturales es más estricto en cuanto a los requisitos técnicos de los sistemas de disposición final, exige además del carbón activo filtros especiales para capturar metales pesados.

En general, las maquinas de tratamiento funcionan bajo una corriente de aire a depresión y en su interior se rompe la lámpara. El vapor de mercurio es absorbido por la campana y las partes que no contienen mercurio son separadas y clasificadas por tipo de material y, después de comprobar su descontaminación, son recicladas. Por su parte el tubo de descarga, que contiene mercurio es separado para un aprovechamiento posterior.

El vidrio sobrante es calentado en un horno para evaporar residuos de mercurio. Luego el mercurio es enfriado y recolectado. El material libre de mercurio es limpiado, enfriado y enviado a reciclaje. El mercurio crudo es recuperado por un proceso térmico y destilado tres veces hasta su completa purificación.

En el DVD adjunto, en el punto 2, se puede hallar más información sobre sistemas de tratamiento de fluorescentes.

Figura 14.9. Maquina de destrucción de lámparas de Hg.

1.5. TELÉFONOS MÓVILES

El auge que han tenido los teléfonos móviles en los últimos años y la velocidad con la que quedan en desuso plantean nuevos problemas medioambientales. Estos terminales tienen baterías y componentes peligrosos y algunos pueden recilcarse.

El crecimiento en número de unidades ha sido espectacular en los últimos años en España (en 2006 se calcula que había 45 millones de móviles, es decir, uno per cápita y, lo más grave, se desecharon 20 millones de aparatos). Continuamente surgen nuevas prestaciones en los móviles que son cada vez más ligeros y pequeños. Esto genera en los consumidores un afán por adquirir los modelos más modernos y ha acelerado la obsolescencia de los terminales.

Además, en la mayoría de los casos resulta más barato comprar un aparato nuevo que reparar el antiguo. Se calcula que la vida útil de un equipo ronda los dos años. Por este motivo son millones los teléfonos que son sustituidos por nuevos modelos cada año. Esto genera un gran volumen de residuos que ha supuesto que las Administraciones Públicas comiencen a tomar la iniciativa, en cuanto a la recogida y reciclaje de estos aparatos. En este sentido, España ha tomado la delantera a la legislación europea sobre esta materia. El peso medio de un teléfono móvil es de 100 g, mientras que para su elaboración se han producido 75 kg de residuos.

Los teléfonos pueden generar tres tipos de residuos:

- Las baterías que pueden ser de ión de litio (Li-ion), las de níquel y cadmio (NiCd) y las de hidruro metálico de níquel (NiMH).
- Los terminales: carcasas de plástico y placas de circuitos impresos.
- Los accesorios: cargadores, teclado, antena, etc.

A la hora del reciclaje se deben separar todos los componentes y eliminar los residuos peligrosos a través de un gestor autorizado. Las pantallas de cristal líquido (LCD) tienen que desmontarse manualmente y las baterías deben ser clasificadas y separadas. Se pueden recuperar los metales preciosos que contienen los esqueletos electrónicos del móvil y también el plástico de la carcasa. Las fracciones obtenidas del despiece del teléfono serán utilizadas como materias primas en la industria electrónica lo que redundará en el ahorro y en el cuidado del medio ambiente.

Por término medio el 60%, en peso, de un móvil es plástico. Del resto, básicamente metales, los más destacables son Cu (10%-20%), Fe (2%÷10%), Al (10%) y cantidades menores de Ta, Ni, Cr, Au u Ag.

La recogida de los aparatos depende del municipio. Asimelec puso en marcha en la Comunidad de Madrid (CAM) una campaña de recogida y reciclaje denominada Tragamóvil.

En el primer trimestre del 2001 se llegó a recolectar 4 toneladas de teléfonos en los 60 puntos de recogida (40 tiendas de telefonía, 18 servicios técnicos, 1 autobús itinerante, Centro del Producto Reciclado).

2. RAEE. Tratamiento de aparatos eléctricos y electrónicos

La cantidad creciente de generación de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE's), así cómo la presencia en ellos de muchos de componentes peligrosos, hace que sea necesario el recogerlos de forma selectiva y someterlos a unos tratamientos específicos.

Una vez vista la necesidad de recogerlos, para tratarlos y valorizarlos, parece obligado empezar por definirlos, y hacerlo de la mano de la Directiva Europea 2002/95/CE, de 27 de enero de 2003, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), y por la Directiva 2003/108/CE, de 8 de diciembre de 2003, por la cual se modifica la Directiva 2002/95/CE. El Ministerio de Medio Ambiente español ha transpuesto mediante el Real Decreto 208/2005, de 25 de febrero, las directivas anteriormente mencionadas, así cómo la Directiva 2002/96/CE, de 27 de enero de 2003, sobre restricciones en la utilización de determinadas sustancias peligrosas en aparatos eléctricos y electrónicos (ROHS).

Una vez mencionadas las directivas que fijan detalladamente los contenidos de tratamiento y valorización, se procederá a resaltar las definiciones allí comprendidas de lo que son aparatos eléctricos y electrónicos, y sus residuos.

Aparatos eléctricos y electrónicos: Aparatos que necesitan para funcionar corriente eléctrica o campos electromagnéticos, destinados a ser utilizados con una tensión nominal no superior a 1.000 V en corriente alterna y 1.500 V en corriente continua, y los aparatos necesarios para generar, transmitir y medir estas corrientes y campos.

Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE): aparatos eléctricos y electrónicos, sus materiales, componentes, consumibles y subconjuntos que los componen, procedentes tanto de hogares particulares como de usos profesionales, a partir del momento en que pasen a ser residuos.

La propia Directiva clasifica los diversos equipos en 10 categorías:

1. Grandes electrodomésticos.
2. Pequeños electrodomésticos.
3. Equipos de informática y telecomunicaciones.
4. Aparatos electrónicos de consumo.
5. Aparatos de iluminación.
6. Herramientas eléctricas y electrónicas.
7. Juguetes y equipos deportivos o de ocio.
8. Aparatos médicos.
9. Instrumentos de vigilancia y control.
10. Máquinas expendedoras.

2.1. GESTIÓN Y TRATAMIENTO DE RAEE'S

Una vez definidos los residuos objeto de tratamiento, se procede a detallar, de acuerdo con las directivas anteriormente indicadas, los mínimos procedimientos a seguir, así cómo los componentes peligrosos a separar.

Los equipos que contengan materiales o elementos peligrosos deberán ser descontaminados. Éste procedimiento de descontaminación, incluirá como mínimo, la retirada selectiva de los fluidos, componentes, materiales, sustancias, y preparados, de conformidad con la lista (I), que se acompaña, o según otras tecnologías de tratamiento que garanticen un nivel, como mínimo equivalente, de protección de la salud humana y del medio ambiente.

Las operaciones de gestión y tratamiento tendrán como prioridad, por este orden, la reutilización, el reciclado, la valorización energética y la eliminación. En las operaciones de valorización les será de aplicación el régimen jurídico establecido en las leyes de residuos, atendiendo a las características de las operaciones y la peligrosidad de los componentes que constituyan el objeto de la gestión.

Todas las operaciones de gestión y tratamiento se realizarán aplicando las mejores técnicas disponibles. En particular, las operaciones de traslado de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos se realizarán de tal modo que se pueda lograr la mejor descontaminación, reutilización, y reciclado de los aparatos enteros, evitando en todos los casos su rotura o manipulación inadecuada. La inadecuada manipulación de los mismos puede dar lugar, por citar dos ejemplos, a la rotura de los circuitos de refrigeración de los aparatos

de frío, ocasionando la pérdida de los gases refrigerantes y su emisión incontrolada a la atmósfera; asimismo en el caso de los televisores y monitores, si se transportaran sin precaución a granel y las pantallas se rompieran no sería posible la descontaminación del polvo fosforescente que se encuentra en su interior, y además se mezclaría el vidrio de pantalla con el de cono, imposibilitando su reciclado.

De acuerdo con la normativa será necesario por parte de las comunidades autónomas así cómo de las entidades locales el promover la adopción de sistemas certificados de las actividades de gestión ambiental de tratamiento de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos.

Así mismo, la entrada o salida del territorio nacional de RAEE's para su tratamiento se ajustará a las normas sobre traslado de residuos establecidas en la ley 10/1998, de residuos, y en el reglamento CEE/259/1993, de 1 de febrero, relativo a la vigilancia y control de los traslados de residuos en el interior, y a la entrada y salida de la Comunidad Europea.

2.1.1. Tratamiento selectivo de materiales y componentes de aparatos eléctricos o electrónicos

1. Cómo mínimo, deberán extraerse los siguientes componentes, sustancias, y preparados, de todos los aparatos eléctricos y electrónicos, recogidos por medios selectivos:
   - Condensadores que contengan policlorobifenilos (PCB), de conformidad con la Directiva 96/59/CE del Consejo, de 16 de septiembre de 1996, relativa a la eliminación de los policlorobifenilos y de los policloroterfenilos (PCB/PCT).
   - Componentes que contengan mercurio, por ejemplo, interruptores o bombillas con iluminación de fondo.
   - Pilas y acumuladores.
   - Tarjetas de circuitos impresos para teléfonos celulares, en general, y otros dispositivos si la superficie de la tarjeta de circuitos impresos tiene más de 10 centímetros cuadrados.
   - Cartuchos de tóner, de líquido y pasta, así como tóner de color.
   - Plásticos que contengan materiales pirorretardantes bromados.
   - Residuos de amianto y componentes que contengan amianto.
   - Tubos de rayos catódicos.
   - Clorofluorocarburos (CFC), hidroclorofluorocarburos (HCFC), hidrofluorocarburos (HFC) o hidrocarburos (HC), no están en el Reglamento 2037/2000.
   - Lámparas de descarga de gas.
   - Pantallas de cristal líquido o LCD (junto con su carcasa si procede) de más de 100 centímetros cuadrados de superficie, y todas las provistas de lámparas de descarga de gas como iluminación de fondo.
   - Cables eléctricos exteriores.
   - Componentes que contengan fibras cerámicas refractarias según la descripción de la Directiva 97/69/CE de la Comisión, de 5 de diciembre de 1997, por la que se adapta al progreso técnico la Directiva 67/548/CEE del Consejo en materia de clasificación, envasado y etiquetado de las sustancias peligrosas.
   - Componentes que contengan sustancias radioactivas, con excepción de componentes que se encuentran por debajo de los umbrales de exención establecidos en el real Decreto 1386/1999, de 3 de Diciembre, por el cual se aprueba el Reglamento de Instalaciones Nucleares y Radioactivas (RINR), por la que se establecen las normas básicas relativas a la protección sanitaria de los trabajadores y de la población contra los riesgos que resultan de las radiaciones ionizantes.
   - Condensadores electrolíticos que contengan sustancias peligrosas de acuerdo con lo establecido en la orden MAM 304/2002 (altura mayor de 25 mm, diámetro mayor de 25 mm o volumen de proporciones similares).
   - Estos componentes, sustancias y preparados se eliminarán o se valorizarán de conformidad con lo estipulado en el artículo 4 de la Directiva 75/442/CEE del Consejo.
2. Los siguientes componentes de aparatos eléctricos o electrónicos recogidos por medios selectivos deberán someterse al tratamiento indicado.
   - Tubos de rayos catódicos: deberá eliminarse el revestimiento fluorescente,
   - Aparatos que contengan gases que agotan la capa de ozono o tienen un potencial de calentamiento global superior a 15, como, por ejemplo los contenidos en espumas o circuitos de refrigeración; éstos gases se extraerán

y se tratarán adecuadamente. Los gases que agotan la capa de ozono se tratarán de conformidad con lo dispuesto en el Reglamento (CE) n.º 2037/2000 del parlamento Europeo y del Consejo, de 29 de Junio de 2000, sobre las sustancias que agotan la capa de ozono.

- Lámparas de descarga de gas: se eliminará el mercurio.

3, Desde el punto de vista ambiental y teniendo en cuenta la conveniencia de reutilizar o reciclar componentes o el aparato completo, los apartados 1 y 2 se aplicarán de tal modo que no se dificulte su reutilización y reciclado correctos.

A continuación se procede a la descripción detallada del tratamiento y reciclaje de los diversos tipos de RAEEs, haciendo especial referencia, por este orden, a los equipos que contienen agentes refrigerantes, como frigoríficos, congeladores y aires acondicionados, y a los equipos que contienen pantallas, como televisores y monitores, así como al resto de ellos.

En el DVD adjunto, en el punto 3, se muestran sistemas de trituración de RAEE.

2.1.2. Reciclaje de equipos que contienen gases refrigerantes

El reciclaje de los equipos regulados por el Real Decreto reviste mayor importancia, si cabe, en aquellos que por cuyas características o componentes estén dentro de los codificados por el Catálogo Europeo de Residuos como peligrosos. Entre éstos cabe destacar por su singular naturaleza los equipos que contienen gases que propician el agotamiento de la capa de ozono y favorecen el llamado efecto invernadero. Se puede considerar que a nivel doméstico éstos son los frigoríficos y congeladores, por un lado, y los equipos de aire acondicionado por otro.

2.1.2.1. Sustancias que agotan la capa de ozono

Los equipos frigoríficos han utilizado comúnmente CFC's como gases refrigerantes y espumantes hasta los años 90 del siglo pasado. Los CFC's son sustancias que favorecen las reacciones químicas que causan el empobrecimiento y deterioro de la capa de ozono.

El principio de funcionamiento de un gas refrigerante es bastante simple. Se trata de confinar este gas en un circuito cerrado y absorber calor del lugar que constituirá la zona a refrigerar y, seguidamente, disipar este calor al exterior. Este movimiento térmico se consigue por medio de la evaporación que produce el enfriamiento y la posterior condensación de este fluido refrigerante, todo ello ayudado por el motor compresor.

Los CFC's también han sido usados como expansores de la espuma de poliuretano rígido que, por su baja conductividad térmica conferida gracias a la estructura celular cerrada, como muestra la Figura 14.10, configura el aislante de las paredes en los frigoríficos. Buena parte del CFC inyectado queda capturado por las celdas después de haber expandido el poliuretano hacia la forma de espuma.

Los CFC's, en caso de ser liberados a la atmósfera de manera incontrolada, actúan por medio de reacciones fotoquímicas en la destrucción de la capa de ozono. La Figura 14.11 muestra el aspecto del agujero de lapa de ozono estratosférico.

Para proteger la salud humana y el medio ambiente y de acuerdo con el Protocolo de Montreal, la Unión Europea quiere, mediante la aplicación de la normativa vigente y en el territorio de su Comunidad, limitar y controlar la producción, comercialización y utilización de sustancias que agotan la capa de ozono, así como la exportación de dichas sustancias a terceros países.

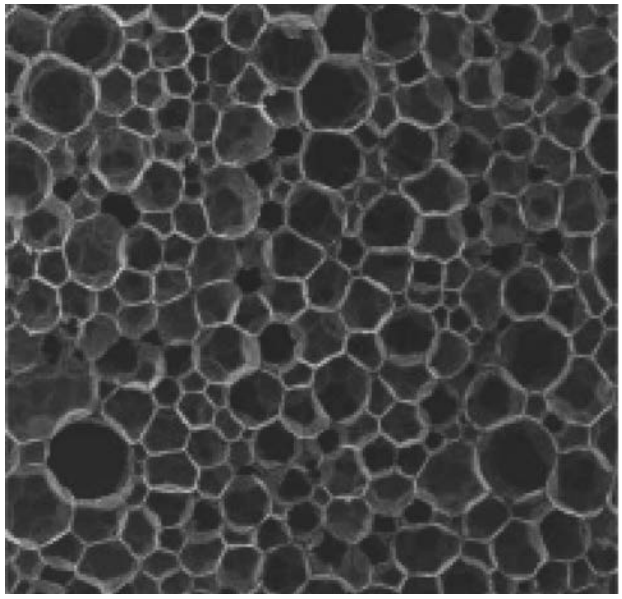


Figura 14.10. Foto microscópica del poliuretano rígido (celdas).

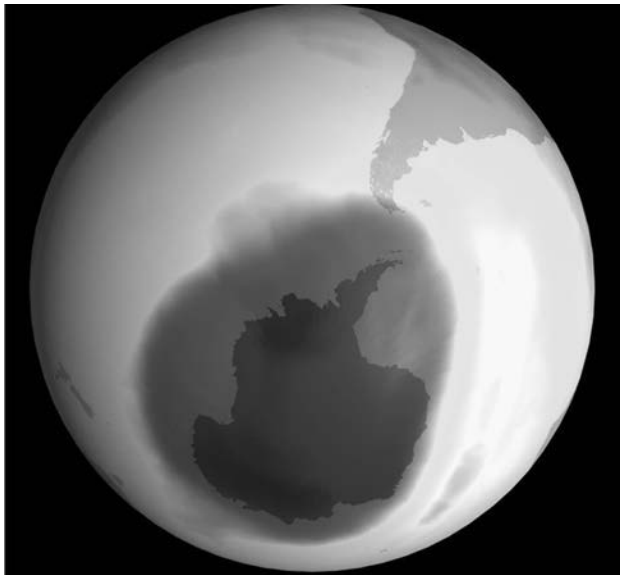


Figura 14.11. Imagen del agujero de ozono más grande en la *Antártida* registrada en septiembre de 2000. Datos obtenidos por el instrumento *Total Ozone Mapping Spectrometer* (TOMS) a bordo de un satélite de la NASA.

2.2. SISTEMAS DE RECICLAJE

A continuación se detallarán los procesos a los que debe someterse un equipo frigorífico fuera de uso para su tratamiento, reciclado y recuperación de las sustancias peligrosas.

Para los equipos de aire acondicionado los procesos a seguir son similares a los que se describen para frigoríficos y congeladores a diferencia de:

- La descontaminación de los circuitos refrigerantes debe tener en cuenta las presiones mucho más elevadas que tienen comparadas con los circuitos de los equipos frigoríficos.
- También son considerablemente mayores las cantidades de gas refrigerante y aceite lubricante contenidas en los compresores de los aires acondicionados.
- Los equipos de aire acondicionado no tienen paredes aislantes de poliuretano.
- Una vez descontaminados los circuitos de frío, el desmantelamiento y segregación de los componentes de los aires acondicionados se realizará con el objetivo de valorizar estas fracciones.

2.2.1. Sistemas de reciclaje de frigoríficos y congeladores

El objetivo principal perseguido con el reciclaje de los frigoríficos domésticos es la recuperación de forma controlada de los fluidos contenidos en estos equipos que puedan significar algún peligro para el medio ambiente.

Así pues, en primer lugar los esfuerzos deben centrarse en la extracción de los fluidos contenidos en los circuitos refrigerantes formados por el compresor, los tubos de circulación y la rejilla posterior. Como fluidos se deben tener en cuenta no sólo los propios gases refrigerantes (CFC, HCFC,...), sino también la recuperación del aceite lubricante del motor compresor, garantizando finalmente que este aceite esté convenientemente desgasificado al final de la operación. La gasificación en el aceite a la que se hace referencia se debe a la difusión del fluido refrigerante en éste, de forma que debido a la propia viscosidad del aceite, se hace difícil que las micro burbujas de gas disueltas emerjan fuera de éste de manera natural.

El siguiente objetivo es recuperar el gas contenido en las espumas aislantes de las paredes del mueble frigorífico. Las técnicas generalmente empleadas en este proceso son las que van destinadas a desmenuzar el poliuretano para liberar el gas contenido. Esto se realiza triturando el mueble frigorífico en unas condiciones determinadas de estanquidad y utilizando las técnicas adecuadas de recuperación del gas liberado en estas condiciones.

Capital importancia requiere el hecho que la utilización, en la actualidad, de gases tipo isobutano o ciclopentano, inflamables, como agentes refrigerantes o espumantes implica la utilización de sistemas de inertización vía nitrógeno gas en las cámaras de trituración para evitar riesgos. Las instalaciones de última generación ya tienen en cuenta esta realidad.

A cada una de estas fases descritas de manera esquemática en la Figura 14.12, se las denomina Fase I (Recuperación de fluidos en el circuito refrigerante) y Fase II (Recuperación de los fluidos espumantes).

Fase I

En la Fase I se recuperan los fluidos del circuito refrigerante. El procedimiento habitual es el siguiente:

- Posicionamiento del equipo frigorífico de forma adecuada para maximizar la recuperación y facilitar la extracción por parte del operario que la realiza.

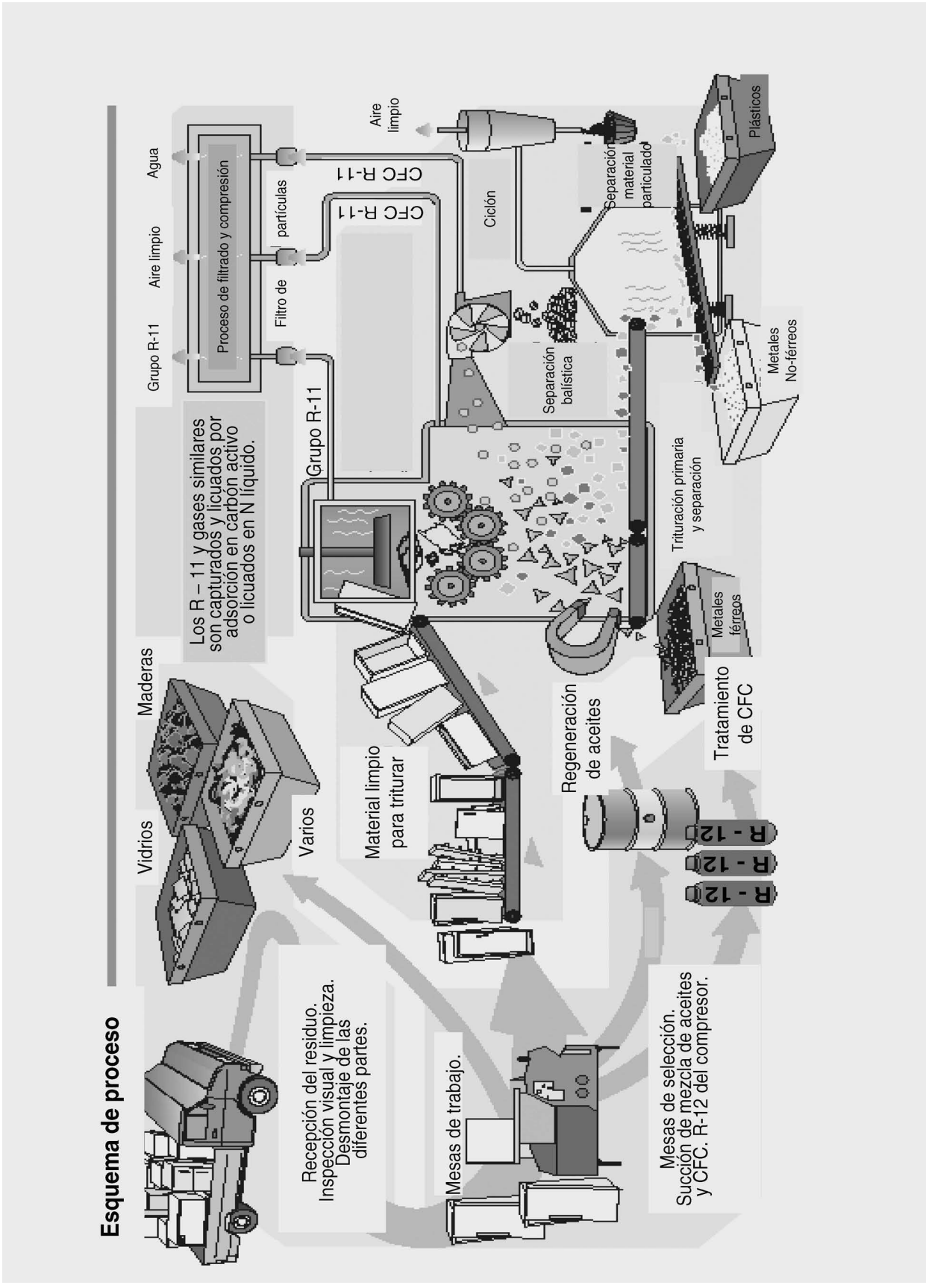


Figura 14.12. Esquema general de una planta de reciclaje de equipos de frío.

Figura 14.13. Cabezal de extracción succionando la mezcla CFC/aceite de un compresor frigorífico.

- Se aplica el cabezal de extracción sobre el compresor del frigorífico, como muestra la Figura 14.13. Este cabezal está dotado de un cierre de goma que evita fugas de fluido y favorece la estanquidad al realizar el vacío entre el cabezal y el compresor.
- Inicio del proceso de vacío previo. Se extrae el aire que pueda haber en el sistema y se garantiza la unión entre el cabezal y el compresor.
- Taladrado en condiciones de vacío. Se inicia la perforación del motor compresor dando lugar a un pequeño orificio por donde serán extraídos los fluidos (gas y líquido).
- Aspiración de la mezcla de fluidos contenidos en el motor.

Transcurrido el tiempo necesario el propio equipo de extracción será el que se encargue de limpiar la mezcla gas-aceite, separarla, desgasificar el aceite y condensar el gas hasta disponerlo en los depósitos a presión adecuados.

Además del método descrito, también se utiliza otro alternativo que se diferencia del anterior en que no se perfora con el cabezal el motor compresor, sino que se realiza un pequeño agujero en una de las conducciones que van al mismo. Este método alternativo puede parecer que presente la ventaja que, al no deteriorarse, el compresor podría ser reutilizado. Este hecho pudiera ser valorado positivamente, no obstante no es posible garantizar la extracción total del aceite lubricante con unos rendimientos suficientes y el aceite continúa teniendo gas disuelto en él. Por esta razón este método se alejaría del primer objetivo ambiental perseguido: la descontaminación.

El gas refrigerante recuperado en esta fase, debe ser gestionado de acuerdo con las posibilidades legales y técnicas. Es decir, para los CFC el destino no puede ser otro que la destrucción completa de forma controlada, ya que no puede ser reutilizado fuera del propio equipo que lo ha contenido. Mientras que en el caso de los HCFC, por ejemplo, éstos pueden ser reutilizados en el mantenimiento y reparación de los aparatos de refrigeración y aire acondicionado existentes hasta el 1 de enero de 2010.

Las técnicas aplicadas en la desgasificación pueden ser diversas. El burbujeo con aire, la aplicación de calor, técnicas de batido y removido, desgasificación por ultrasonidos o combinaciones de cualesquiera de las anteriores pueden ser algunos de los ejemplos aplicados con el fin de limpiar el aceite.

Una vez realizado este proceso, este aceite ya libre de gases contaminantes es apropiado para el envío a un gestor de aceites para terminar con su reciclaje completo y su puesta de nuevo en el mercado.

Fase II

En este segundo paso, como muestra la Figura 14.14, se persigue la maximización de la extracción de los agentes espumantes usados en la expansión del poliuretano de las espumas. Esto se consigue con la trituración del mueble del frigorífico. Sin embargo, para evitar dañar o mermar el rendimiento de la trituración, se debe considerar como paso previo a la misma que el frigorífico no contenga ningún componente que pueda dificultar la operación. Esta necesidad obliga a introducir un proceso, previo a la trituración, de desmantelamiento de algunas partes. Comúnmente se extraen de manera manual el motor

Figura 14.14. Foto partes desmanteladas manualmente: Filtro, cable y motor.

compresor, las bandejas de vidrio y, eventualmente, los transformadores que puedan llevar. Asimismo se aprovecha este desmantelamiento de piezas para retirar el filtro deshidratador (constituido principalmente de cobre) y el cable eléctrico del frigorífico para su valorización segregada. Además en algunos casos se procede a la retirada de la rejilla trasera del condensador, también para su valorización.

Una vez se han extraído los elementos necesarios el frigorífico es triturado en una cámara estanca en condiciones de depresión, de esta manera se pretende propiciar que los gases espumantes contenidos se liberen dentro de esta cámara, pero evitando que escapen al exterior de ella.

2.2.2. Sistemas de trituración de los muebles frigoríficos

Básicamente existen dos variantes.

2.2.2.1. Por triturador-desgarrador

En este sistema, el frigorífico cae sobre unas cuchillas circulares, como muestra la foto de la Figura 14.15, dotadas de unos salientes metálicos (porras o martillos) que se clavarán en el mueble frigorífico y lo desgarrarán en pequeños fragmentos. Este proceso está complementado por una prensa que empujará al frigorífico contra las cuchillas y por un tamiz, por debajo de las cuchillas que solo permitirá el paso de aquellos fragmentos triturados de diámetro inferior al de los agujeros del tamiz. Es el sistema más común y de resultados comprobados.

Figura 14.15. Foto de las cuchillas desgarrando un frigorífico.

Figura 14.16. Foto de la prensa interior del triturador.

La Figura 14.16, muestra el principio de funcionamiento de la prensa que comprime los residuos y los empuja hacia el rotor del triturador.

2.2.2.2. Por cizallador de corriente transversal

Este proceso somete los frigoríficos a altas aceleraciones, golpeándose entre sí. Es decir, los propios elementos duros que componen el frigorífico y especialmente sus aristas, actúan como elementos de corte para los materiales más blandos y frágiles. Así, cada uno de los materiales adquiere una granulometría diferente, de acuerdo con su propia dureza y en función del tiempo que estos materiales se hayan mantenido en el atritor. La aceleración transversal es generada por una gran cadena unida a un rotor. Se trata de un proceso de aplicación muy reciente a los frigoríficos.

Una vez se realizada la trituración se obtiene por una parte una atmósfera confinada, rica en el gas espumante que debe ser tratada convenientemente y unas fracciones de materiales que son valorizables.

Para poder valorizar de forma óptima estos materiales se debe buscar la mayor pureza de cada uno de los flujos salientes de la trituración. Las técnicas de separación de cada uno de estos materiales son múltiples y pueden ir apareciendo otras nuevas. Algunos ejemplos son:

- *Aspiración:* La aspiración de material pretende separar la parte más liviana del «todo uno». Este método sería el utilizado para segregar las fracciones de espumas de poliuretano.

- *Cribado:* Este método se utiliza para separar las partículas más finas después del proceso de trituración. Este proceso es particularmente efectivo para los sistemas que incorporan un cizallador de corriente transversal ya que, atendiendo a la diferencia de granulometría que este produce, el polvo de poliuretano es separado de manera efectiva respecto al resto de fracciones.
- *Overband magnético:* Consiste en un imán o electro-imán envuelto por una cinta transportadora. El material férrico al pasar cerca de éste es atraído por el imán y capturado por la cinta transportadora hasta una sección de la misma donde cesa el efecto magnético y el metal cae.
- *Mesa densimétrica:* Se trata de un equipo que separa dos fracciones de diferente densidad, Estas pueden ser aluminio-cobre, plástico-aluminio, plástico-acero inoxidable. La máquina se compone de un motor que produce un giro con una determinada excentricidad y este movimiento es transmitido como vibración a una superficie inclinada donde en su parte central cae el material a separar. El material con mayor densidad absorberá la vibración y la utilizará como medio para desplazarse en sentido ascendente sobre la superficie inclinada, mientras que los materiales más ligeros caerán por la parte inferior de la superficie inclinada. Además puede separarse una tercera fracción por aspiración sobre la mesa.
- *Separador por corrientes de Focault* o «*Eddy Currents*»: Sirve para separar material metálico del no metálico. Este equipo se compone de una cinta transportadora cuyo extremo final está dotado de un rodillo con un potente inductor electromagnético integrado. Al pasar material metálico sobre este rodillo se inducen en los fragmentos diferencias de potencial entre los extremos del propio material.
  Este diferencial de potencial eléctrico está cortocircuitado por el propio material metálico donde se genera, con lo que se crean unas corrientes de forma inducida y estas engendran una fuerza electromotriz en el material, haciendo girar el material sobre si mismo y lanzándolo hacia delante. Este material será recogido por un colector situado a distancia, por delante del extremo de la cinta. En el material plástico y el vidrio no se induce ninguna corriente y, por tanto, al llegar al final de la cinta transportadora la fracción plástica caerá por gravedad y será recogido por un colector diferente.

Figura 14.17. Vista general del Centro de Tratamiento y Reciclaje de Frigoríficos situada en El Pont de Vilomara i Rocafort (Barcelona). Se aprecia el separador de corrientes de Focault y las aspiraciones que conducen el poliuretano hasta la etapa de compactación (Briquetado).

La atmósfera generada en la trituración de los frigoríficos es conducida a la etapa de tratamiento de gas donde se pretende recuperar el gas espumante. Para optimizar el rendimiento de extracción del gas diversas partes de la segregación de materiales están dotadas de aspiraciones que aportan mayor caudal de gas espumante hacia el tratamiento.

Es especialmente importante utilizar la mejor técnica disponible para aumentar al máximo la recuperación del gas contenido en la espuma de poliuretano triturada una vez separada como fracción aparte. Las dos tecnologías propuestas en las plantas actuales son:

- *Compactación:* El objetivo buscado en la compactación de la espuma de poliuretano es exprimir el contenido de aire, extrayendo el gas de las burbujas del aislante. Además se consigue un valor añadido al reducir el volumen de la misma, lo que mejora los costes de transporte de la espuma compactada. Existen dos formas de compactar la espuma: mediante briquetado o peletizado.
- *Pulverización:* Se trataría de obtener la fracción de poliuretano lo más pequeña posible para que el CFC contenido se libere fácilmente. En las plantas dotadas de un cizallador de corriente transversal, la espuma de poliuretano se obtiene con una granulometría suficientemente reducida. Es frecuente utilizar una etapa de calentamiento en la salida de este material, para desgasificar al máximo la matriz de poliuretano.

El caudal de aire sucio (mezcla del aire ambiente más el agente espumante) debe ser limpiado en diferentes procesos. En primer lugar se le extrae el polvo y la contaminación de materia particulada a través de sistemas de filtraje. A continuación se somete a una etapa de enfriamiento, con el objetivo de condensar el agua de la humedad ambiente que el aire pueda contener. Para esto es suficiente enfriar por debajo de la temperatura de rocío. El agua condensada, con trazas de gas refrigerante, debe ser recogida adecuadamente para su posterior tratamiento.

Finalmente el sistema más comúnmente utilizado en la actualidad para la recuperación del gas refrigerante es el enfriamiento drástico del caudal de aire al pasarlo por un intercambiador, con o sin compresión previa, que funciona con un flujo de nitrógeno líquido. Éste toma calor del caudal de aire sucio enfriándolo, mientras el nitrógeno se gasifica.

En la perdida de temperatura del aire sucio (por debajo de los –120 ° C) el gas espumante es condensado y recogido en un recipiente. De esta manera queda finalizado el tratamiento de los agentes espumantes y solamente se emite a la atmósfera exterior el aire limpio. Otro sistema también utilizado es la captación del gas refrigerante en filtros de carbón activo que, una vez saturados son regenerados por calentamiento (extracción del gas) y posterior enfriamiento (condensación del gas), si bien el mayor rendimiento y flexibilidad del primer sistema implica su mayoritaria aplicación el las instalaciones más recientes.

La gestión del gas espumante obtenido al final del proceso debe correr la misma suerte que el gas refrigerante recuperado en la Fase I. Así pues, el CFC R-11, que ha sido el más comúnmente utilizado en la expansión de espumas aislantes en las paredes de los frigoríficos, deberá ser destruido vía tratamiento térmico para su correcta gestión final.

2.2.3. Conclusiones sobre el reciclaje y gestión de equipos refrigerantes

Gracias a los procesos descritos se logra evitar las emisiones a la atmósfera de los CFC y HCFC contenidos en los equipos frigoríficos y aires acondicionados. Con ello se contribuye a salvaguardar la capa de ozono, al mismo tiempo que se evita el efecto invernadero que estos gases pueden propiciar.

Por otro lado se logra recuperar y reciclar una serie de materias primas que son muy valiosas. La tasa de recuperación de los materiales que componen los frigoríficos se puede estimar actualmente entre el 86% y el 90% en peso, muy por encima de los requerimientos de la normativa vigente. Además, si se realiza algún tipo de valorización de las espumas de poliuretano, sea a través del propio reciclado o de la valorización energética, la tasa de recuperación en los frigoríficos se sitúa por encima del 95% del peso total del frigorífico.

El reciclado y puesta en el mercado de estas materias primas, no solamente contribuye a compensar parte de los costes generados en el reciclado de los frigoríficos, sino que representa un ahorro ambiental enorme al evitar el coste energético y de recursos que supone la extracción y procesado de las materias primas.

Con la salida de estos materiales y su posterior utilización en la fabricación de nuevos componentes

y equipos, se cierra un circulo de la vida útil de estos equipos para volver a empezar de nuevo, utilizando no solamente materias recicladas, si no otras sustancias nuevas que puedan ser más respetuosas ambientalmente.

2.3. RECICLAJE DE EQUIPOS QUE CONTIENEN PANTALLAS

El tratamiento específico de televisores y monitores que contienen pantallas se esquematiza en la Figura 14.18.

Las opciones básicas son:

1. Los televisores son desmontados. La carcasa de plástico se selecciona según su composición y la calidad, para su posterior trituración.
2. El cono de vidrio se perfora con cuidado para eliminar el vacío y conseguir que el aire entre dentro, a fin de evitar una posible implosión.
3. Mediante hilos de cobre incandescentes u otras tecnologías análogas, se separa el vidrio de la pantalla del vidrio del cono.
4. Los vidrios del cono y de la pantalla se almacenan separadamente.
5. Posteriormente se retira por aspiración el polvo fosforescente del vidrio de la pantalla.
6. Las carcasas de plástico o madera se trituran para su posterior reciclado o eliminación.

La Figura 14.19 muestra un esquema de la secuencia de tratamiento de los componentes electrónicos en el proceso de trituración y separación.

2.4. RECICLAJE DEL RESTO DE APARATOS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS

Mediante el proceso de descontaminación se extraen, si están presentes, los componentes peligrosos, como pueden ser las pilas, los cartuchos de tinta y tóner, entre otros. A continuación se depositan los aparatos en una cinta transportadora que alimenta una cámara cerrada donde comenzará el proceso de trituración o fragmentación. Los materiales ya fragmentados pasan a la línea de selección donde, por medio de sistemas automáticos y también de forma manual se realiza la selección del material valorizable separándolo del rechazo. Se clasifican los diferentes materiales por tipos (hierro, aluminio, cables, plástico, tarjetas, etc.), que posteriormente se harán llegar a gestores recuperadores externos autorizados.

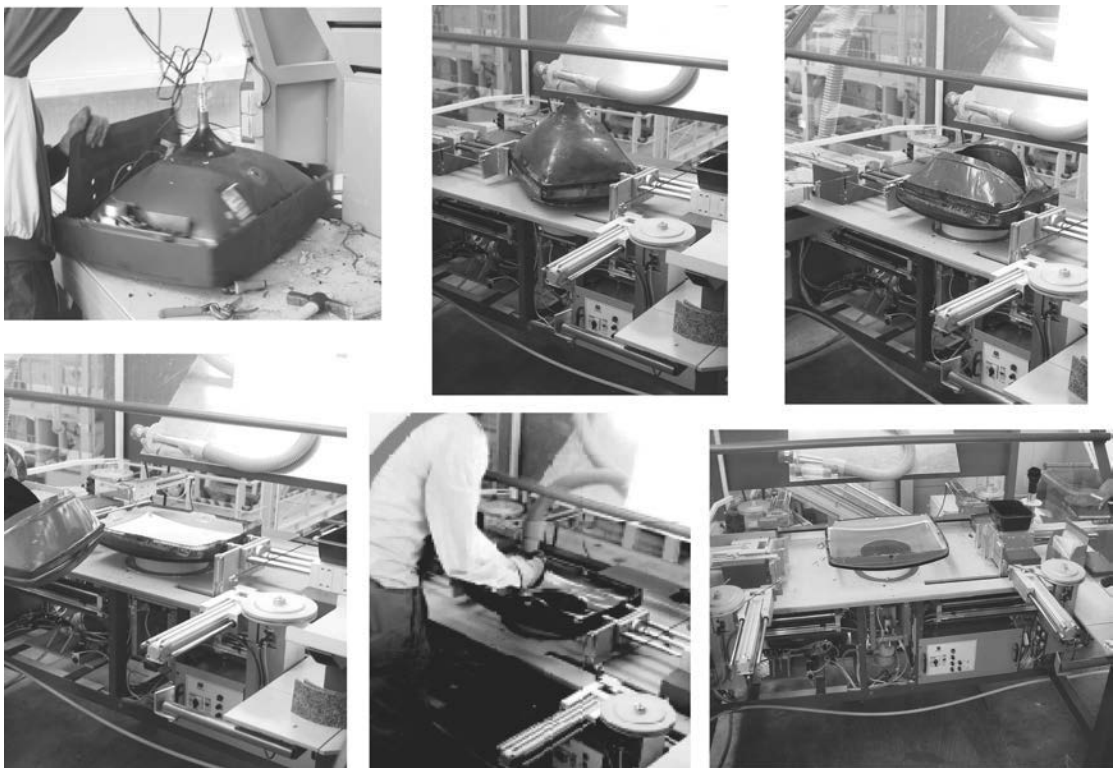


Figura 14.18. Línea de desmontaje de pantallas de televisores.

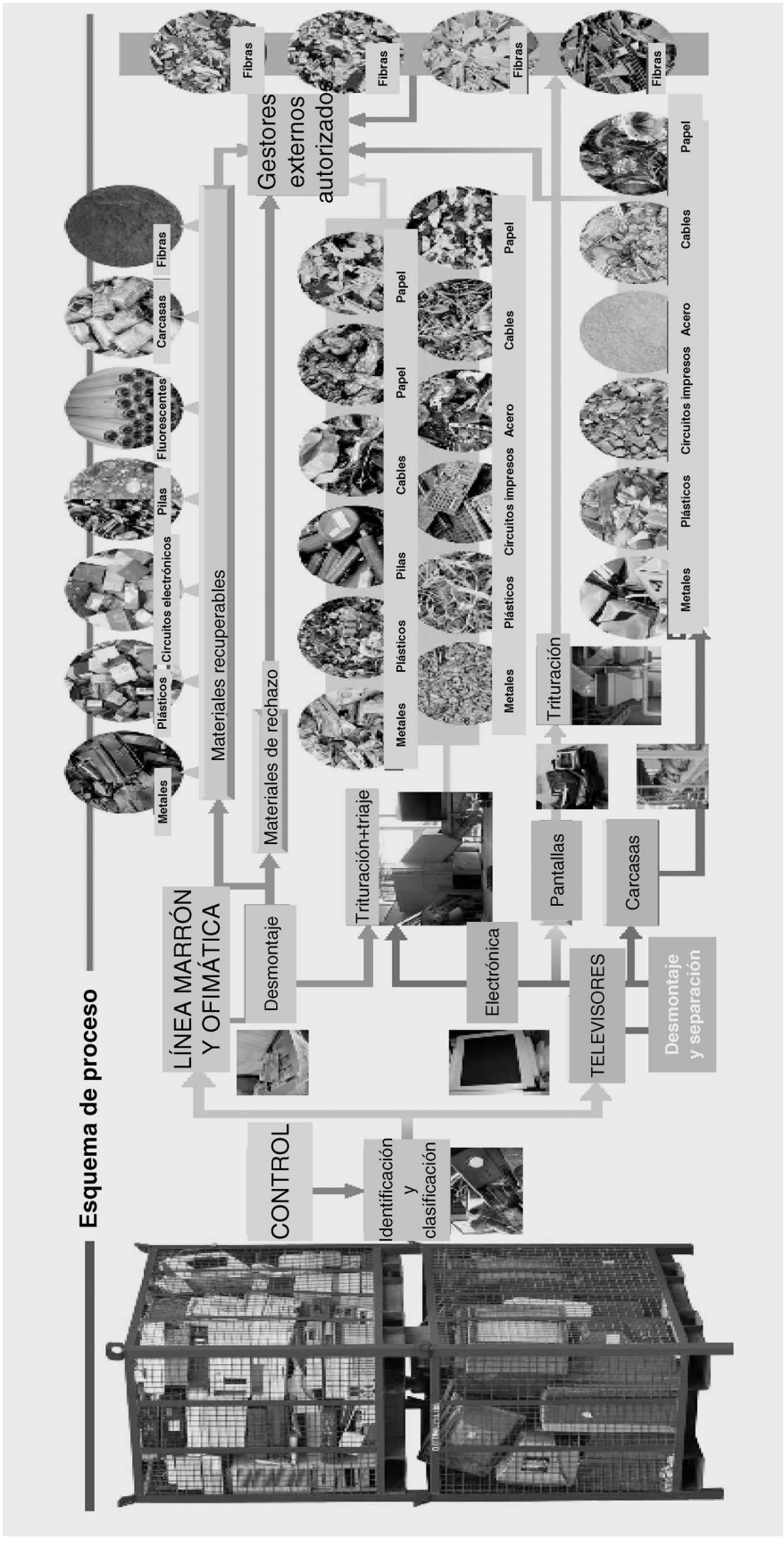


Figura 14.19. Esquema general de una planta de reciclaje de equipos electrónicos.

2.4.1. Valorización de aparatos eléctricos y electrónicos

Los objetivos de valorización que se han fijado con la nueva ley se reflejan en la Tabla 14.3.

Bajo estos parámetros, y a título de ejemplo para una planta que reciba RAEE's procedentes del flujo doméstico, la composición media de los productos obtenidos que garantice un 80% de valorización debería de ser como la especificada en la Figura 14.20, si bien dependerá del flujo de aparatos recibidos.

Tabla 14.3. Objetivos de valorización y reciclaje de RAEE's

Categoría	Valorización (%)	Reutilización y reciclaje (%)
Grandes electrodomésticos y dispensadores automáticos (Categorías 1 y 2)	80	75
IT y equipos de telecomunicaciones y electrónica de consumo (Categorías 3 y 4)	75	65
Pequeños electrodomésticos, equipos de iluminación, herramientas eléctricas y electrónicas, juguetes, equipos de medición y control (Categorías 2, 5, 6, 7 y 9)	70	50
Lámparas		80

2.4.2. Composición de los materiales obtenidos valorizables

Las diversa fracciones recuperadas serán enviadas a recuperadores especializados en cada tipo de material para obtener el máximo aprovechamiento de los mismos. Especial atención merecen las tarjetas electrónicas puesto que, pese a su peso proporcionalmente pequeño, pueden contener metales de muy alto valor como oro, plata, paladio y otros. Es importante señalar que la recuperación adecuada de los dos tipos de vidrio de pantalla constituye uno de los principales retos para alcanzar los porcentajes de valorización indicados por la normativa.

2.4.3. Composición de los materiales obtenidos no valorizables

Las diversas fracciones no aprovechables, como la relación que muestra la Figura 14.21, obtenidas deben ser gestionadas vía eliminación por los cauces adecuados. Sin embargo no puede olvidarse el potencial energético

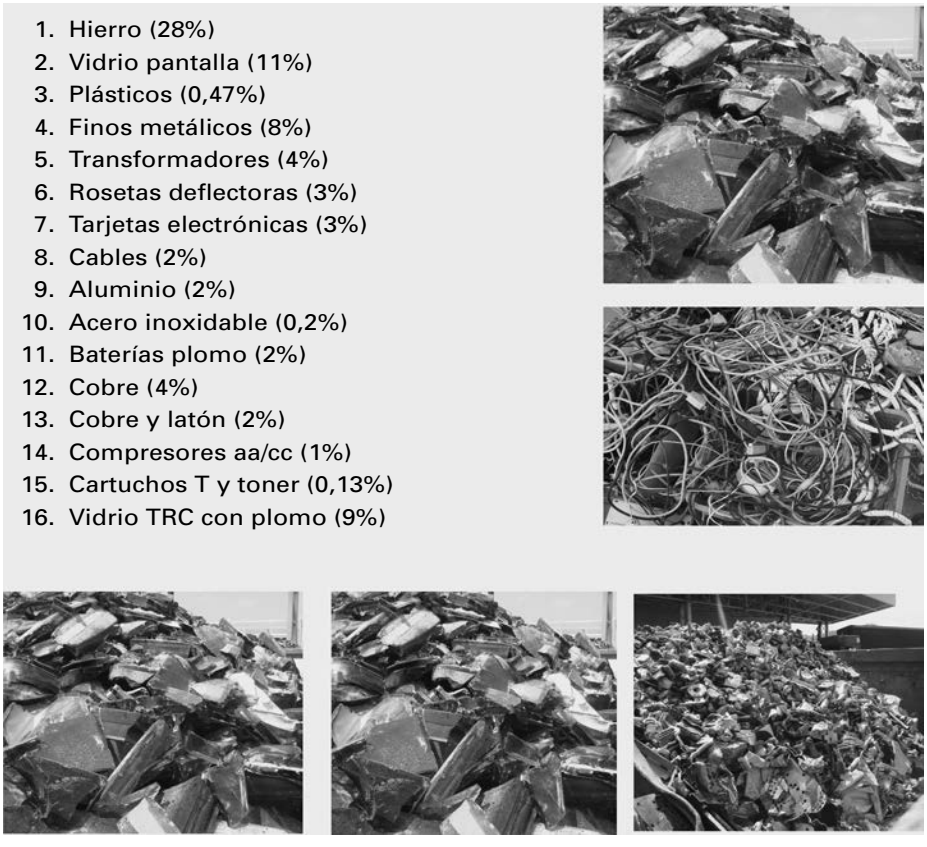


Figura 14.20. Fracciones valorizables de los RAEE's.

1. Mixtos de plásticos y metales no férricos
2. Pilas botón, bastón... (0,02%)
3. Maderas con impropios (8,9%)
4. Fósforo pantallas (0,0o1%)
5. Condensadores PCB (0,08%)
6. Polvos de filtros (0,09%)

Figura 14.21. Fracciones no valorizables de los RAEE's.

de alguno de ellos, como la madera y los plásticos. Así pues, y siempre en instalaciones adecuadas, podrán valorizarse energéticamente, aumentando el porcentaje global de valorización material y energética.

Gracias a los procesos descritos se logra evitar la posible contaminación del entorno, aprovechando al máximo y de forma selectiva una serie de materias primas que son muy valiosas. La tasa de recuperación de los materiales que componen los diversos RAEE's oscilan, pero caso de alcanzarse los valores previstos se recuperarán una gran cantidad de materias primas, con todas las ventaja ambientales que esto representa.

2.5. RECICLAJE DE CIRCUITOS IMPRESOS

Los residuos de circuitos impresos constituyen uno de los desechos más complejos de tratar. Su extracción de por sí es una labor ardua ya provenga de un aparato de la serie marrón, un TV o un PC.

Una vez extraído, la primera operación consiste en la separación de los componentes voluminosos insertados en él como resistencias, potenciómetros, condensadores, etc. Entre ellos debe prestarse atención especial a los relés confeccionados con mercurio o a los antiguos componentes fabricados con amianto o bien a los acumuladores de Ni-Cd. Seguidamente el conjunto se tritura para su fase posterior.

El triturado se introduce en un reactor de pirólisis para destruir el soporte de plástico. Este proceso presenta la ventaja que elimina, térmicamente, el soporte sin la presencia de aire lo cual evita la oxidación de los metales presentes. Estos se introducen en un horno de crisol donde funden y se eliminan el resto de las impurezas no metálicas.

La última etapa es la separación de los metales, por procedimientos químicos convencionales, y el afino de los mismos. Por regla general, la recuperación de los metales preciosos presentes, en especial oro, permite la viabilidad económica del proceso.

2.6. IMPACTO AMBIENTAL DE LOS EQUIPOS Y MAQUINARIA DE OFICINA

En este apartado se comentan algunas particularidades con repercusiones ambientales de los equipos que son más frecuentemente usados en la oficina como: máquinas de escribir, fotocopiadoras, impresoras, equipos de fax, etc.

Las máquinas de escribir, hoy en día en clara regresión, no producen más impacto ambiental que las cintas textiles desechables y el ruido (al igual que muchas impresoras matriciales). Las impresoras láser generan ozono (las concentraciones en los lugares de trabajo no deberían superar los 0,1 ppm), y es por ello que disponen de un filtro de carbón activo. Se recomienda adquirir impresoras en las que el relleno del tóner se efectúa a partir de material reciclado.

Las fotocopiadoras, así como las impresoras, se postula que sean de los modelos de fijación a baja temperatura, inferior a los 110 °C, con el objetivo de reducir las emisiones al mínimo.

En cuanto a los equipos de fax se recomienda usar aquellos que utilizan papel normal, ya que el papel térmico no es reciclable.

Con referencia a las pantallas de ordenadores, al margen de los sistemas de reciclaje que se aborda en otra sección, se recomienda elegir modelos de baja radiación. Así como, dentro de lo posible, evitar la utilización de pantallas fosforescentes en ambientes secos ya que propician la acumulación de carga electrostática en la superficie de la pantalla.

3. Reciclaje y tratamiento de pilas y baterías de potencia

Por lo general, se distingue entre pila y batería. La pila es aquel aparato destinado a almacenar energía eléctrica en forma de energía química que, cuando se agota el electrolito deja de funcionar y deviene residuo. Es decir, son de un solo uso.

La batería realiza la misma misión que la pila pero es recargable. De esta manera puede tener una vida útil muy larga.

En 2007 investigadores del Instituto Politécnico de Los Ángeles han desarrollado un nuevo soporte para almacenar energía, la «batería biodegradable», a base de una lámina de papel negro. Está fabricada a partir de nano componentes y puede servir tanto para el almacenamiento de energía como para condensadores eléctricos (Fuente: *Proceedings of the National Academy of Sciences*, agosto).

En este apartado se lleva a cabo una incursión sobre la problemática ambiental de ambos tipos de almacenamiento de energía.

3.1. CLASIFICACIÓN DE PILAS

La Figura 14.22 muestra la clasificación de pilas a la llegada a la planta de tratamiento. La primera etapa consiste en la identificación y separación por tipos. Debido a que, desde el punto de vista ambiental el principal problema es el mercurio, al enumerar cada tipo de pila se indica el contenido medio de este metal pesado, y la cantidad de unidades que de cada clase se generaron en España en 1990.

De entre las denominadas pilas normales, las más habituales son:

- Salinas de carbón-zinc, también llamadas pilas secas con un contenido en Hg < 0,025%. (270 millones de unidades (m.u.) de residuos en 1990).
- Alcalinas de manganeso, son pilas de larga duración con cubierta metálica y contenido en Hg = 0,1% (30 m. u. de residuos en 1990).

De entre las denominadas «botón», las más usuales son:

- De óxido de mercurio, < 30% de Hg en peso. (3 m.u./año).
- De ánodo de litio, exentas de mercurio. (1,3 m.u./año).
- De zinc-aire, = 1% de Hg. (1,7 m.u./año).
- De óxido de plata, = 1% de Hg. (4 m.u./año).

En Europa la media de producción es:

- Zn-C y Álcali-Mn. 97,0%
- Ni-Cd. 2,0%
- Conteniendo mercurio 0,5%
- Litio 0,5%

Tipos de pilas

En la Tabla 14.4, la Tabla 14.5 y la Tabla 14.6 se exponen las composiciones medias de los diversos tipos de pilas. Así como en la Tabla 14.7, la cantidad de residuo que ello supone, en unidades y en cantidad.

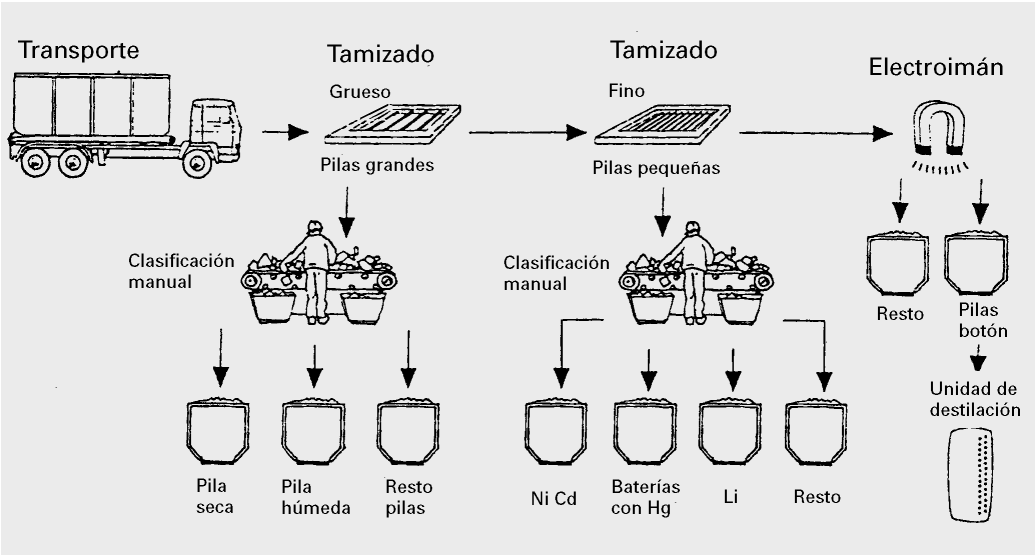


Figura 14.22. Clasificación de pilas.

Tabla 14.4. Descripción esquemática de las baterías urbanas

	Cátodo	Ánodo	Electrolito
Zn/C (Leclanché)	Hoja de Zn	MnO_2 + Grafito	$NH_4Cl + ZnC1_2$
Verde (Leclanché)	Hoja de Zn	MnO_2 + Grafito	$NH_4Cl + ZnC1_2$
Zn/Mn (Alcalina)	Polvo de Zn (+Pb +Hg)	MnO_2 + C+KOH	KOH + 6% ZnO
Mercurio	Polvo de Zn (+Hg)	HgO + C	KOH + ZnO
Óxido de plata	Polvo de Zn (+Hg)	$Ag_2O + MnO_2$	KOH ó NaOH + ZnO
Zn/Aire	Polvo de Zn (+Hg)	O_2 en C activo	KOH
Litio	Litio metal	MnO_2 o Bi_2O_3	Disolvente orgánico
Ni/Co	$Co/Co(OH)_2$	$NiO(OH)/Ni(OH)_2$	KOH+Li(OH)

Tabla 14.5. Composición aproximada de las baterías urbanas

	% Zn	% MnO_2	Hg	% Ag	% C	% Fe	% Ni	Cd	% Pb	KOH/ NaOH	Papel + Plast.	H_2O
Zn/C (Leclanché)	18 a 20	28	< 0,01%	—	8	16	—	0,01%	0,05	—	9	10
Zn/Mn (Alcalina)	13 a 15	23	< 0,025%	—	3	35 a 37	—	< 0,025%	0,05	5	4	8
Mercurio	10 a 11	—	30%	—	4	40	—	—	—	7	5	3
Óxido de plata	10 a 11	—	< 1%	28 a 30	—	40 a 45	—	—	—	8	5	3
Zn/Aire	30	—	1%	—	Alto	45	—	—	—	5	5	3
Litio (2% Li)	—	25	—	—	—	50 a 60	—	—	—	—	5	—
Ni/Co (Cerrada)	—	—	—	—	—	20 a 25	13 a 15	—	10	32	20	—
Plomo/Ácido	—	—	—	—	—	—	—	—	65	—	10 a 20	12 a 15
Verde (Leclanché)	18 a 20	28	< 1PPM	—	8	16	—	< 15 PPM	?	—	9	10

Tabla 14.6. Descripción esquemática de las baterías urbanas

	Gran bloque	Cilíndrica	Paralelepipédica	Botón	Petaca	Gran dado	Plana
Zn/C (Leclanché)		X	X		X	X	X
Zn/Mn (Alcalina)		X	X	X		X	
Mercurio		X		X		X	
Óxido de plata		X		X		X	
Zn/Aire			X	X		X	
Litio (2% Li)				X			
Ni/Co (Cerrada)	X	X	X				
Plomo/Ácido	X		X				
Verde (Leclanché)		X	X				

Tabla 14.7. Consumo de baterías urbanas

	Mundo Occidental 1987		Bélgica 1987		España 1987		Francia 1987	
	Unidades (millones)	Toneladas (miles)	Unidades (millones)	Toneladas	Unidades (millones)	Toneladas	Unidades (millones)	Toneladas
Zn/C (Leclanché) + Verde	21.400	1.543	52	1.950	182	6.825	200	9.200
Zn/Mn (Alcalina)	3.800	373	20	1.500	102	5.250	280	10.080
Mercurio	—	—	1,7	5,6	6,0	20	8.6	30
Óxido de plata	—	—	1,5	1,7	5,3	6	1,7	10
Alcal. + Zn/Aire + Litio	—	—	0,7	0,6	2,5	2,1	10,3	20
Ni/Co (Cerrada)	—	—	—	280	—	980	32	2.640
Plomo/Ácido	—	46	—	—	—	—	—	—
Total pilas botón	1000	2.1	4	8	14	28	35	60

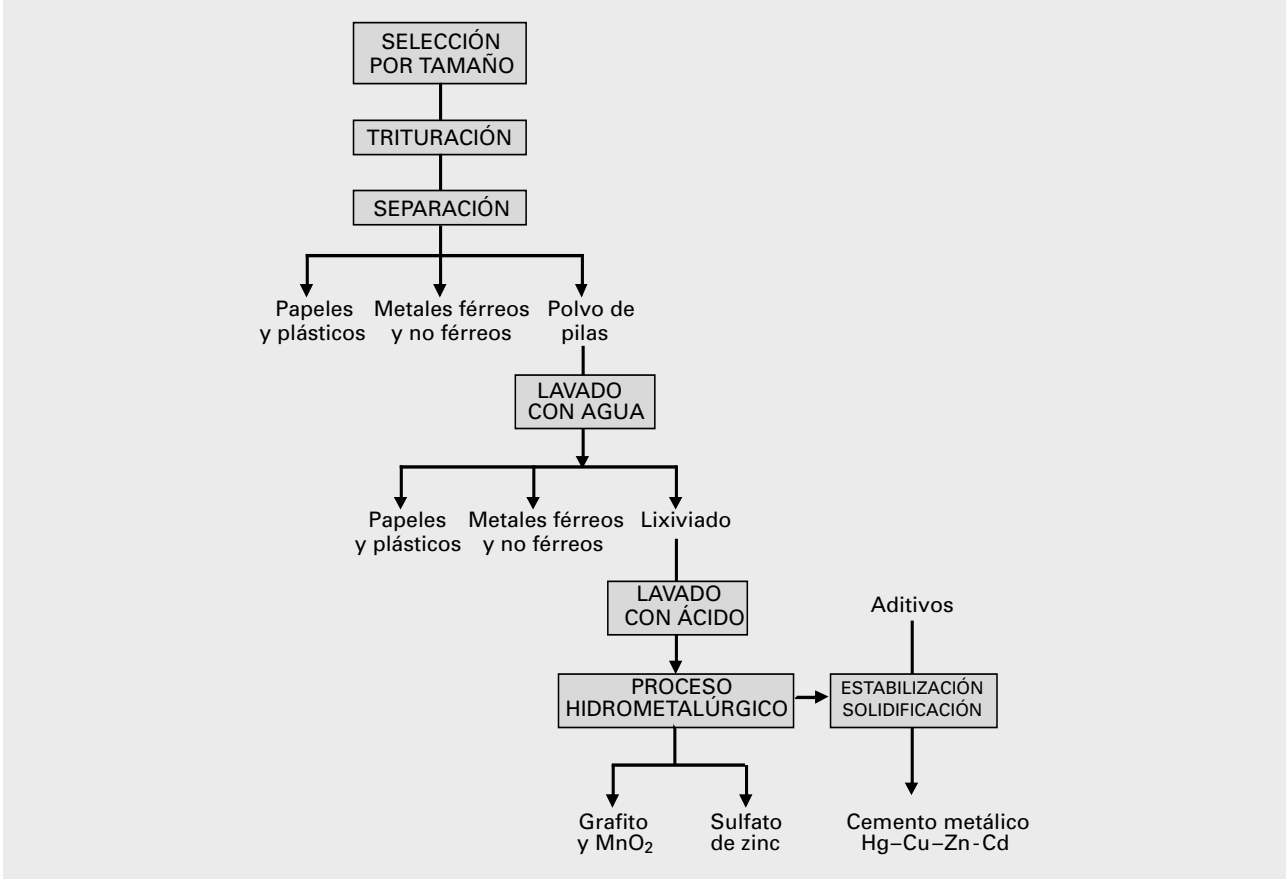


Figura 14.23. Esquema de una planta de tratamiento y reciclaje de pilas.

3.1.1. Planta de tratamiento y reciclaje de pilas

El objetivo del tratamiento y reciclado de las pilas es la obtención y recuperación de los materiales que contienen, básicamente metales.

La planta se basa en la combinación de dos procesos:

1. *Proceso mecánico:* trituración de las pilas y obtención de fracción salina y de los materiales que constituyen la envoltura.

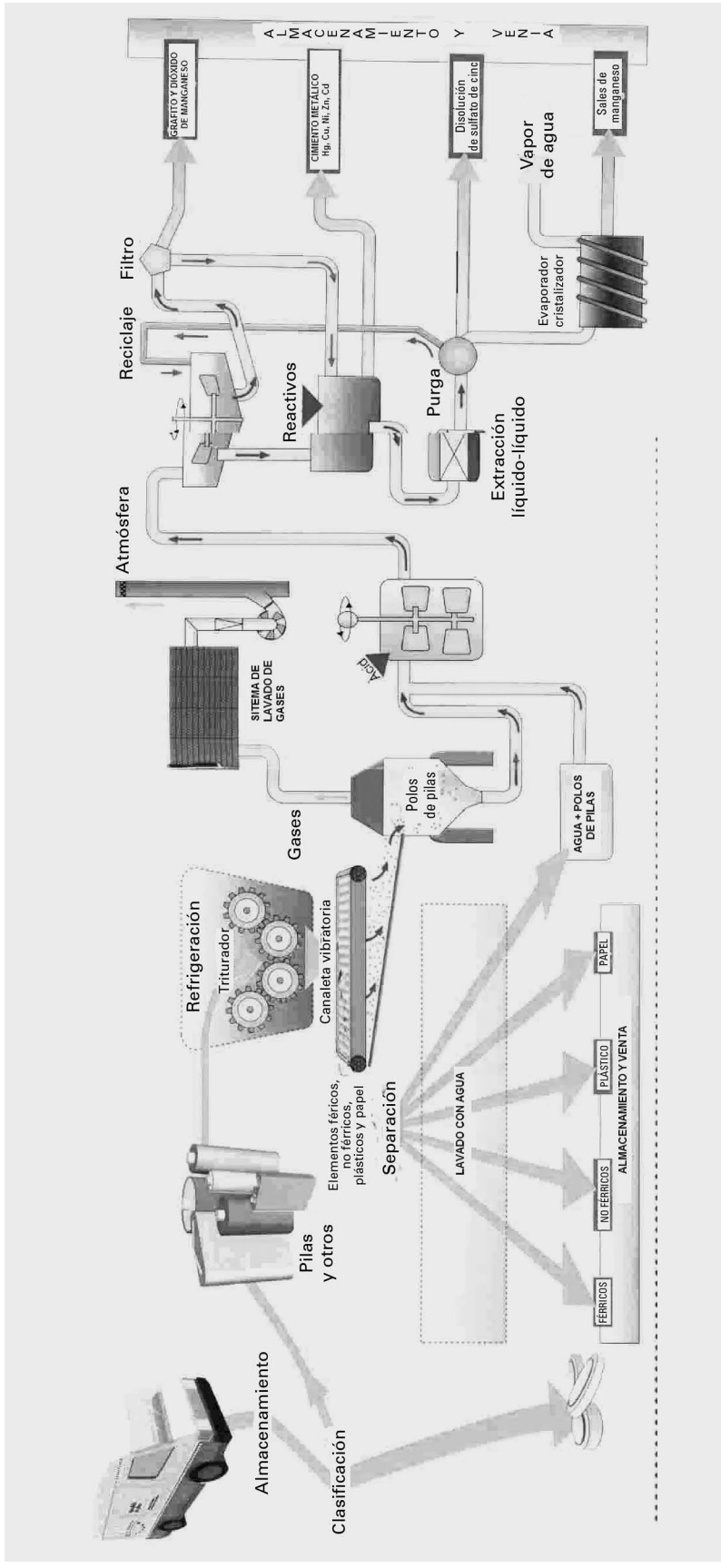


Figura 14.24. Proceso hidrometalurgico de reciclado de pilas salinas y alcalinas.

2. *Proceso hidrometalúrgico:* especialmente diseñado para la recuperación de los elementos metálicos contenidos en la fracción salina de las pilas. Se recuperan en forma de disoluciones de elevada pureza, metales y sales reutilizables en otros procesos industriales.

Antes de someter las pilas a los procesos indicados se clasifican mediante cedazos donde se separan las pilas botón del resto.

- *Proceso vía húmeda o hidrometalúrgico:* Es aquel que utiliza la lixiviación como principal técnica seguida de purificación, concentración, precipitación, etc.
- *Proceso vía seca o piro metalúrgico.* Es aquel que usa tecnologías en que el calor es el principal agente desencadenante de las reacciones: calcinación, tostación, fusión, etc.

3.1.2. Proceso hidrometalúrgico de reciclado de pilas salinas y alcalinas

La mezcla de pilas a su ingreso en la planta de tratamiento entra en un molino donde se trituran. Seguidamente una mesa vibrante separa la fracción gruesa: envoltorios, plásticos y papeles del resto.

La fracción fina, que es la que contiene los elementos contaminantes, es sometida a un proceso hidrometalúrgico para recuperar los metales contenidos. El proceso esta diseñado para recuperar los elementos mayoritarios como el manganeso y el zinc.

El polvo es conducido a un reactor donde se le añade ácido. En el primer decantador se extrae, por el fondo, la mezcla de grafito y bióxido de manganeso.

Añadiendo reactivos y precipitadores se consigue formar un cemento que contiene Hg, Zn, Cu, Ni, Cd, etc. El líquido saliente pasa por un extractor líquido/líquido donde se segrega el agua para reciclarla de nuevo. Del líquido restante se sintetiza el sulfato de zinc y sales de manganeso.

3.2. LA RECUPERACIÓN DEL MERCURIO

La Figura 14.25 muestra el esquema básico para el tratamiento de pilas con contenido de mercurio (básicamente pilas botón). Los residuos son calentados, en atmósfera inerte, en una cámara de vacío (1), lo

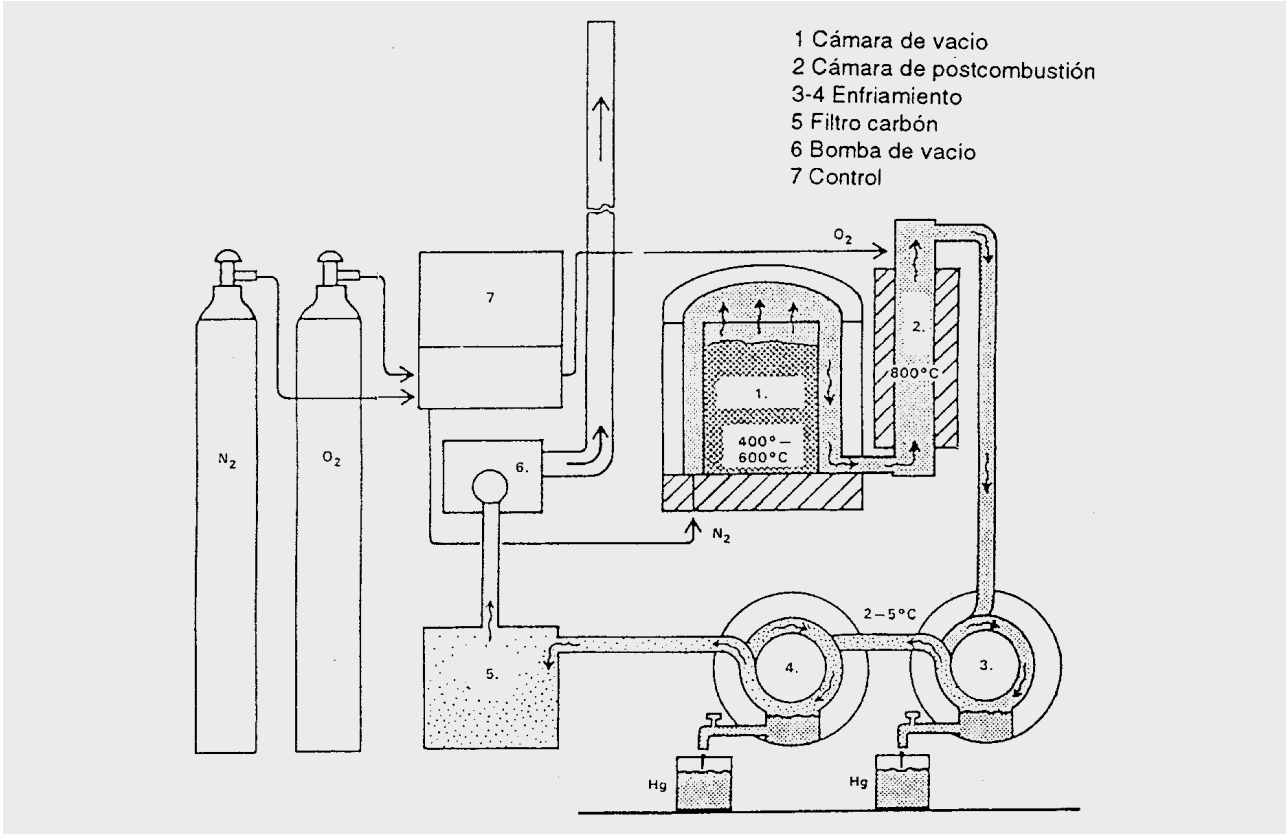


Figura 14.25. Tratamiento de pilas de botón.

que produce la vaporización de Hg. En la cámara siguiente de postcombustión (2) las partículas orgánicas arrastradas por los gases son oxidados. Los gases son conducidos a un enfriador (3 y 4) donde se recupera el Hg condensado. Los gases residuales pasan a un filtro de carbón activo situado junto a la bomba de vacío (5). Las cenizas, libres de Hg, pueden ser llevadas al vertedero y los gases residuales emitidos a la atmósfera.

La Tabla 14.8 muestra las cantidades anuales estimadas (en toneladas de Hg) generado en las incineradoras de RSU en EE UU y su proyección.

Tabla 14.8. Fuentes de mercurio en EE UU.

Producto	1989	1995	2000
Pilas alcalinas	57,0	6,5	0,0
Pilas de mercurio/zinc y pilas botón	27,0	20,0	19,0
Otras pilas	0,8	0,5	0,0
Fluorescentes	3,6	5,1	7,6
Lámparas alta intensidad	0,1	0,2	0,2
Termómetros clínicos	2,3	2,6	3,2
Termostatos	1,5	1,0	2,0
Pigmentos	1,0	0,5	0,2
Aplicaciones dentales	0,6	0,5	0,4
Pinturas para papeles	0,2	0,0	0,0
Interruptores eléctricos	0,1	0,3	0,4
Residuos de pinturas	2,4	0,3	0,1
Total	96,6	37,5	33,1

3.3. BATERÍAS DE AUTOMOCIÓN

La batería o acumulador de plomo es aquel aparato destinado a almacenar o acumular energía eléctrica en forma de energía química y su actividad es reversible durante una larga temporada de su vida útil. Cuando se agotan, su destino es el tratamiento para obtener plomo de segunda fusión y otros subproductos.

Se distinguen los siguientes tipos de baterías:

- Batería de arranque: automovilismo, náutica, grupos electrógenos, etc.
- Batería de tracción: carretilla eléctrica, vehículos eléctricos, náutica y submarinos.
- Batería estacionaria: regulaciones de frecuencia y carga de redes eléctricas, centros informáticos, telecomunicaciones.

La vida media de las baterías de automóviles es de 3 años, y 10 años para las de tracción y estacionarias. El grado de recuperación como chatarra a nivel mundial se aproxima al 85%.

Una batería nueva se compone generalmente de la siguiente manera:

- *Recipiente o envase:* polipropileno copolímero.
- *Placas:* las positivas, peróxido de plomo; las negativas, plomo puro esponjoso.
- *Bornes y puntos de conexión:* aleación plomo-antimonio.
- *Separadores:* polietileno y fibra.
- *Electrolito:* ácido sulfúrico diluido (concentración máxima del 22%).

En contraste, la composición media de las baterías viejas es:

- Sulfatos y óxidos: 44%
- Metales: 33%
- Plásticos: 4%
- Separadores: 2%
- Envases: 2%
- Agua ácida: 15%

Por su volumen y composición las baterías de plomo/ácido son residuos susceptibles de ser reciclados. La industria automovilística tiene actualmente en cuenta esta posibilidad a la hora de diseñar sus modelos con el fin de facilitar la separación de los componentes que integran la batería.

La composición media de una batería, en peso, se muestra en la Tabla 14.9.

Tabla 14.9. Composición de las baterías

Componente	% peso	Componente	% peso
Ácido sulfúrico	11	Polipropileno	5
Plomo metálico	34	Ebonita	3
Pasta	39	Vidrio y otros	0,5
Hierro	0,5	PVC y otros	7

En España la cifra de acumuladores que se convierten en residuo cada año se estima en 80.000-100.000 toneladas. Otro dato a tener en cuenta es que, aproximadamente, un 60% del plomo del mercado se emplea en la fabricación de baterías, la segunda aplicación, con menos de un 10%, es la fabricación de pigmentos y colorantes.

El proceso de reciclaje es el siguiente. En primer lugar se vacía el electrolito, que suele tener una riqueza del 25-35% en SO_4H_2 (Dado el bajo precio de este ácido, de momento es inviable su aprovechamiento, por lo que se neutraliza con

NaOH y se deposita en vertedero). Seguidamente el conjunto se tritura, se lava y, por flotación, se separa el plástico. (Este se vuelve a lavar, se tritura más y se vende).

La pasta fangosa metálica se deshidrata y se conduce a un horno de fusión. Al horno se añade un potente reductor, como el coque, para evitar la formación de óxidos de plomo. El producto resultante se afina y se halla expedito para la venta.

Tradicionalmente, la batería es el primer elemento a recuperar de un automóvil. En el año 1999 se alcanzaron a recuperar 100.000 toneladas, que comparado con Francia, por ejemplo, es una cifra baja (200.000 toneladas recuperadas en Francia en el mismo año).

No todas las baterías de plomo están estructuradas de la misma manera, y las más comunes son las baterías de arranque utilizadas principalmente en automóviles, náutica, o grupos electrógenos y que normalmente sirven para arrancar un motor de combustión. Este tipo de batería puede tener diferente potencia y amperaje; y tomada en conjunto representa hasta el 80% del peso de todas las baterías. El 20% restante se distribuyen entre las de tracción y las estacionarias.

Las baterías de tracción son generalmente de grandes dimensiones, contenidas en cajas de acero y pueden llegar a pesar hasta 1.600 kilos. Se utilizan, por ejemplo en los toros eléctricos o las carretillas elevadoras y de tracción.

Las baterías estacionarias son las que generalmente se emplean en los sistemas de seguridad de cajas y bancos para evitar que un corte en el suministro eléctrico deje sin energía a los sistemas; son también las que se encuentran en centros estratégicos de defensa, de telecomunicaciones o en quirófanos. Este tipo de baterías es mucho más cara que los otros dos tipos.

4. Tratamiento de vehículos fuera de uso (VFU)

El parque automotor español en el año 2003 contaba con aproximadamente 18.500.000 vehículos; de los cuales anualmente en promedio se retiran de circulación 1.000.000, generando 308.000 toneladas de residuos entre los que se puede destacar 61.500 toneladas de líquidos tóxicos o peligrosos, 1.400 toneladas de baterías y 13.400.000 litros de aceite que requieren gestión apropiada.

La directiva sobre vehículos fuera de uso, cuyos principales objetivos son evitar la contaminación por productos en los vehículos desechados, prevenir su abandono y promover el reciclaje, supone un cambio en la gestión de los principales sectores afectados que son los fabricantes, usuarios y recicladores. Las primeras consecuencias supondrán la transformación de los desguaces antes del 2007, así como la reestructuración del sistema de financiación de recogida y tratamiento de vehículos fuera de uso (VFU).

Actualmente el porcentaje de recuperación de materiales que forman el vehículo es de un 75% centrándose en su fracción metálica. Se pretende que con la nueva legislación este porcentaje aumente al menos en un 85%. Para ello el dueño del vehículo deberá dejar el vehículo en los centros autorizados de recepción y recuperación (CARD) de una manera gratuita. La directiva contempla que el fabricante es el último responsable del vehículo fuera de uso. Este parque supone, una vez reciclados, entre 700.000 y 800.000 toneladas de chatarra férrica y unas 70.000 o 80.000 toneladas de metales no férricos.

El CARD está previsto que funcione como una cadena de desamblaje de piezas. Primero se extraen todos los líquidos (lubricantes, combustible, refrigerantes, etc.), la batería y los neumáticos. Luego, se retiran piezas que puedan ser aprovechadas en el mercado de segunda mano (faros, espejos, etc.). Los vidrios, plásticos especiales, gomas, etc., también se retiran para su posterior reciclado y el resto, se destina a la industria siderúrgica.

La fracción a eliminar corresponde a dos grandes grupos; materiales inertes y productos especiales. El primero está formado por elementos como tapicerías, espumas de asientos, y otras fracciones textiles o plásticas no aprovechables, que seguirán existiendo a pesar de los esfuerzos de la directiva y los fabricantes por crear y emplear materiales recuperables para todos los usos. Estas no tienen por que ser separadas en los CARD. En las industrias siderúrgicas, como primer paso, durante la trituración, fragmentación, de los coches estos artículos son eliminados mediante separación magnética.

Las piezas reutilizables como recambios en el mercado de segunda mano deberán ofrecer las garantías de calidad exigidas a una pieza nueva, tanto si pertenecen al funcionamiento del vehículo como si, sobre todo, forman parte de sus elementos de seguridad pasiva o activa.

La otra fracción, la que está compuesta por materiales recuperables es, en términos económicos, la más interesante. Acero, aluminio, cobre, plomo, zinc son algunos de los componentes metálicos de todos los vehículos. En España, el 7% de la materia del sector metalúrgico eléctrico, procede de los vehículos fuera de uso. Cada vez más, la industria automovilística tiende a fabricar vehículos más ligeros, seguros y con más prestaciones al usuario mediante el uso de nuevas aleaciones de acero, disminuyendo su porcentaje sobre el total del peso del vehículo, usando más el aluminio. La investigación en nuevos materiales ha cambiado la composición en peso de los automóviles.

La regulación de los residuos al llegar al final de su vida útil, esta regulado por la Directiva 2000/53/CE, «Vehículos Fuera de Uso» (VFU). La Directiva establece unos criterios de gestión acordes con la política medioambiental:

- A partir de 2007, el dueño del vehículo debe poder entregarlo gratuitamente a una empresa de desmontaje registrada.
- A partir de 2003 se restringirá el uso de metales pesados en la fabricación.
- Valorización de la mayor parte de los componentes. Antes del 1/1/06 se deberá reutilizar y valorizar más del 85% (Para los vehículos fabricados antes del 1980, esta tasa se reduce al 75%).
- El vertido no será superior al 15% en peso. Para facilitar esto, algunos países como Alemania fijan la tasa de vertido en 500 /t.
- Para alcanzar semejantes metas debe procederse al desmontaje selectivo.

En cuanto a las obligaciones de los fabricantes de automóviles, el RD 1383/2002, establece:

- Fase 1: Diseño de vehículos, de manera que puedan ser reciclados o reutilizados en porcentaje creciente llegando al 95% en 2015.
- Fase 2: Fabricación de vehículos, de manera que facilite el desmontaje y utilizar normas de codificación para identificar los componentes.
- Fase 3: Comercialización de vehículos, los fabricantes y distribuidores están obligados a hacerse cargo de los vehículos que hayan fabricado, garantizando la suficiencia de las instalaciones destinadas a tal fin.

En contrapartida, las obligaciones de los usuarios son:

- Entregar el vehículo, cuando llegue al fin de su vida útil, a un Centro Autorizado de Tratamiento (CAT) para proceder a su desmontaje y descontaminación.
- Obtener el oportuno certificado de entrega y baja del vehículo.
- Considerar la utilización de piezas y elementos reciclados.

La composición media de un vehículo ha cambiado mucho en los últimos años y, en consecuencia, también la caracterización de los residuos de los VFU.

La primera característica es que el peso medio ha descendido desde los 1.000 kg del año 80 a los 800 kg de la actualidad. La Tabla 14.10 muestra, en porcentaje de peso, esta diversidad de composición.

Tabla 14.10. Composición porcentual en peso de un automóvil

Material	1975	1990
Hierro y acero	73,5	61,0
Metales no férricos	7,0	9,5
Plásticos	8,5	9,3
Vidrios	3,0	3,0
Gomas	5,0	5,0
Otros	6,5	10,0
Total	100,0	100,0

Desde el punto de vista del reciclaje el gran aumento de los composites no favorece el reciclaje, pero la disminución de peso es muy favorable.

Todavía con mayor detalle la Tabla 14.11 reproduce la composición en peso de un vehículo moderno de 800 kg.

Un vehículo medio en la planta de desguace arroja la cantidad de 27,0 kg. compuestos de una serie de residuos peligrosos como:

- Combustible 0,0-50 l
- Refrigerante motor 2,5-3,0 l
- Aceite motor 4,0-5,0 l
- Aceite transmisión 3,5-4,0 l
- Líquido refrigerante 2,5-3,0 l
- Otros líquidos 0,6-1,0 l
- Batería Pb 8-11 kg
- Fluido aire acondicionado 0,7-0,9 kg
- Catalizador 1 Unidad
- Air-bag 0-2 Unidades
- Zapatas con amianto 0-2 Unidades
- Filtro de aceite 0-2 Unidades

Tabla 14.11. Composición porcentual de un vehículo moderno

Componente	%
Chapas de acero	39,0
Acero/piezas de forja mecanizadas	13,0
Fundición	13,0
Equipos mecánicos	5,1
Total piezas férricas	**70,1**
Aluminio	4,5
Cobre, Zinc y otros metales	0,4
Total piezas no férricas	**4,9**
Plásticos	8,5
Equipo eléctrico	3,2
Caucho	4,0
Vidrio	3,5
Textiles	1,2
Aceites y grasas	1,0
Papel y cartón	0,5
Combustible	0,3
Varios	2,8
Total resto	**25,0**
Total VFU	**100,0**

Como se observa una cantidad notable de líquidos, su mayoría, son altamente contaminantes. Hay que hacer notar que cuando el vehículo se abandona los líquidos son los primeros es escaparse y su capacidad de contaminación es elevadísima. Es por ello que en toda práctica de desmontaje debe prestarse la primera atención a la modalidad selectiva.

El automóvil fuera de uso es un residuo muy complejo y, hasta la fecha poco se ha pensado en su reciclaje. La presión ambiental es cada día más evidente y, en la actualidad, algunas marcas comienzan a diseñar los vehículos para que puedan ser fácilmente desmontables cuando se hallen fuera de uso. La Figura 14.26 muestra las partes de un soporte y catalizador de automóvil.

4.1. PREVISIBLE EVOLUCIÓN TÉCNICA Y AMBIENTAL DEL AUTOMÓVIL

El automóvil simboliza el paradigma de nuestra civilización y progreso. Sin embargo, desde el punto de vista ambiental presenta unos inconvenientes que deben analizarse bajo diferentes puntos de vista. Como punto de partida de esta reflexión vale la pena contemplar los resultados de la Tabla 14.12 referentes a la movilidad en las ciudades.

Es difícil establecer, *a priori*, una correlación de los resultados pero, parece evidente que existe una cierta relación entre la renta per cápita y el modelo de movilidad. Este baremo no es válido para las ciudades europeas, sin embargo, el problema de fondo es el mismo.

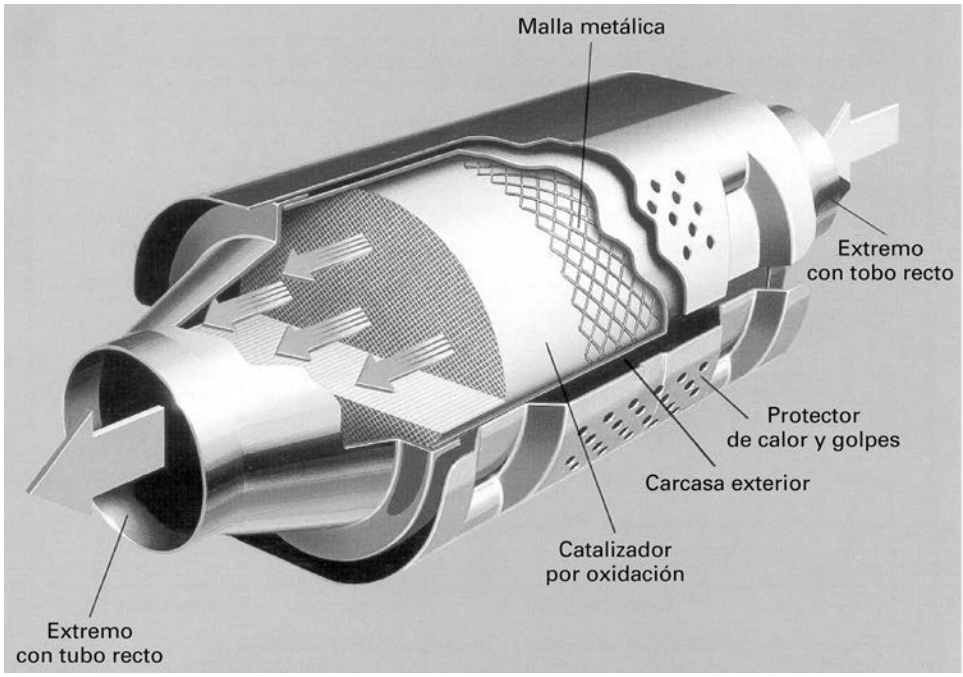


Figura 14.26. Partes integrantes de un catalizador de automóvil.

Tabla 14.12. Movilidad, en %, en diversas ciudades americanas (Fuente Ecoengen)

Ciudad	Automóviles	Autobuses	Camiones	Otros
Bogotá	61	15	5	19
Los Ángeles	95	1	4	0
México (DF)	91	3	5	1
Santiago (Chile)	88	6	6	0

4.1.1. Automóvil y residuos

Un vehículo presenta unos impactos ambientales que arrancan en su fase de fabricación, bien desconocido por el gran público. Además para su fabricación exige, una media de energía de 1.000 kW · h por unidad, mientras que el rendimiento químico/mecánico del automóvil en servicio, escasamente alcanza el 30% en autopista (en ciudad difícilmente sobrepasa el 10%, de ahí el que se hayan desarrollado los «vehículos híbridos»), es decir, por cada 100 unidades energéticas introducidas en forma de energía química, solo aprovecha un 30% para su desplazamiento.

Más conocidos son los residuos que produce en su fase de servicio: los neumáticos, la batería, el aceite, los filtros, etc., puesto que ello se manifiesta en los talleres de reparación. Desde el punto de vista ambiental, el taller no deja de ser un gestor de residuos, puesto que dicha actividad potencialmente entraña una peligrosidad. A este aspecto se refiere la Ley 3/1998 sobre Intervención Integral de la Administración Ambiental (IPPC).

Finalmente, cuando el vehículo se desecha, aparece otra problemática. Los residuos procedentes de los automóviles usados, constituyen una verdadera preocupación para las autoridades medioambientales por diversos motivos:

- Es un residuo muy abundante (en España hay una media de casi 700 vehículos por cada 1.000 habitantes) con un potencial contaminante muy alto y un fuerte impacto medioambiental.
- Es un residuo complejo ya que se compone, a su vez, de un conjunto de residuos líquidos, gaseosos y sólidos.
- La logística de recogida es cara y complicada (trámites administrativos y dispersión geográfica).

En la actualidad el tratamiento de los VFU se reduce a dos opciones básicas, que esencialmente son:

- La fragmentación.
- El desguace selectivo.

A grandes rasgos, la Directiva 2000/53/CE relativa al desguace de vehículos entró en vigor el 21 de abril de 2002 y establece los objetivos de:

- Reutilización, reciclaje y valorización de los VFU, responsabilizando a los fabricantes del coste de la retirada de los vehículos. Cumpliendo las normas de garantía que establece la ley, los talleres de reparación pueden encontrar en esta etapa, desguace selectivo, una fuente potencial de negocio (piezas de recambio garantizadas).
- Antes del 2005 la recuperación de materiales ha de ser del 85% en peso del vehículo. Se está cerca del cumplimiento ya que, en peso, más del 70% del automóvil son metales fáciles de recuperar. No obstante, la problemática sobrevendrá próximamente ya que el porcentaje de metal en los nuevos vehículos es cada vez menor.
- La Directiva pretende controlar los residuos finales que, tras un máximo reciclaje, produce un residuo peligroso *Automotive Scheder Residue* (ASR) que representa un 25% del peso total del vehículo.
- La deposición de este residuo y el coste de desmantelamiento para el reciclaje de los VFU suponen un elevado precio que los fabricantes intentan disminuir mediante el diseño de nuevos vehículos, facilitando su desmantelamiento (disminución del tiempo medio para cada modelo), utilizando materiales más fáciles de reciclar, etc.

La Figura 14.27 simboliza la generación de residuos del automóvil, que en cifras redondas ronda los 60 kg/persona y año.

4.1.2. Automóvil, reciclado y contaminación

La industria en general, y la del automóvil en particular, para aumentar la seguridad ha desarrollado los denominados materiales compuestos (composites), donde el neumático (caucho, acero, negro de humo, óxido de zinc, etc.) es un claro exponente. Las prestaciones técnicas de estos materiales son imprescindibles pero, a la hora del reciclaje, son un gran problema.

Desde el punto de vista sanitario y ambiental, la generación total de residuos no es nada comparada con la producida en la fase de funcionamiento (fase operativa o de funcionamiento) en forma de gases. En el aspecto cualitativo, los dos tipos de

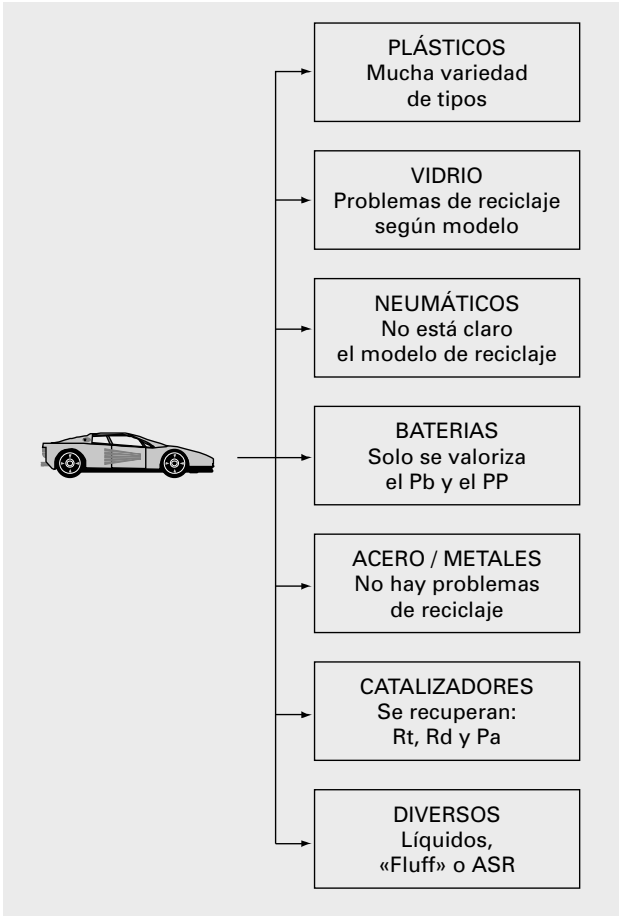


Figura 14.27. Generación de residuos en el automóvil.

carburantes más usados presentan los siguientes problemas:

- *Gasolinas.* En la UE se ha prohibido el uso de gasolinas con plomo (aditivo: plomo tetraetilo: 0,1%), después de comprobar la peligrosidad de este metal y la relación existente entre plomo en sangre y tráfico. El plomo es un metal pesado y por tanto bioacumulativo (afecta a la producción de hemoglobina). Por otra parte las gasolinas sin plomo, no están exentas de riesgo ya que en su composición hay cantidades notables de compuestos químicos tóxicos (benceno, tolueno, etc.).
- *Diesel.* No tiene la problemática antes citada pero su combustión es difícil (hidrocarburos inquemados) y emite mucho material particulado.

Para paliar los efectos nocivos de los gases emitidos es obligación la instalación de catalizadores, en especial para el monóxido de carbono y los óxidos de nitrógeno.

La correlación entre el contenido de plomo en sangre y automoción es casi directa. En EE UU se aprobó en 1986, a partir de la *Ley de Aire Limpio*, la supresión de las gasolinas sin plomo. En este año el nivel de plomo en sangre era de 625 veces el que tenían los ciudadanos hace cien años. A partir de este año el nivel de plomo en sangre se redujo en un 80%, no obstante el Pb es un metal pesado y el organismo no lo elimina sino que se acumula en huesos y otros tejidos.

El plomo en la atmósfera procede de las gasolinas con plomo, la minería y la industria. Cada año se lanzan, de manera legal, mas de 100.000 toneladas de este metal a la atmósfera. La investigación sobre el aire ocluido en las gotas de aire retenidas en los hielos antárticos ha demostrado que, la atmósfera anterior a 1920, carecía de plomo.

En este sentido es aleccionador citar las maniobras de la Ethyl Corporation (empresa estadounidense que se creó en la década de 1920 como filial de la General Motors, la Standard Oil y la Du Pont, para la producción de plomo tetraetilo para adicionar a las gasolinas). Prácticamente desde la fundación de dicha empresa hubo casos de graves intoxicaciones y muertes con las consiguientes denuncias. Para persuadir a la población de la inocuidad de su fabricado, el aditivo a base de plomo, la Ethyl Corporation financió innumerables análisis de heces y orines donde, jamás de detectó plomo. Como es bien sabido, el Pb es un metal pesado que se bioacumula y no se excreta. Sus directivos, gente influyente, consiguieron que se cortará la financiación de investigadores que trabajaban sobre los efectos del plomo en el organismo.

En el mismo sentido, pero con referencia al efecto invernadero de los gases resultantes de la combustión de los carburantes para automoción, ha saltado a la opinión pública, a primeros de 2007, el escándalo de la ExxonMobil (Empresa Norteamérica que es la primera petrolera del mundo) que durante años ha sobornado a centros de investigación, técnicos y divulgadores para que desinformaran a la opinión pública sobre el problema del efecto invernadero, a modo semejante de lo que hizo la industria del tabaco en relación a la nicotina.

Según la Comisión Europea, el informe 2005 de la Organización Mundial de la Salud y el Ministerio de Medio Ambiente de España, en toda Europa el aire sucio es el responsable de 225.000 muertes prematuras por diversas causas (afecciones respiratorias y cardiovasculares), lo que supone más del doble de las muertes causadas por accidentes de tráfico en el mismo periodo (90.082). La proporción, conside-

rando sólo España, se incrementa en un alarmante 5% a 1% (15.000 vs. 3.329). En el área urbana de Barcelona el nivel de algunos contaminantes está por encima del doble de los límites máximos que establece la Unión Europea, en concreto las partículas en suspensión de menor tamaño y los óxidos de nitrógeno causados por los tubos de escape de los vehículos, las industrias y el polvo fundamentalmente.

El transporte privado representa el 3% del PIB de la UE, convirtiéndose en un sector clave de la economía; sin embargo, el análisis ambiental descubre numeroso extracostes como el impacto económico causado por los accidentes, pérdidas por contaminación atmosférica, congestión del tráfico, daños al paisaje y la naturaleza, contribución al cambio climático y contaminación sonora. Para minimizar y/o eliminar estos aspectos las administraciones deben estimular el transporte público, instaurar medidas para pacificar el tráfico de vehículos en las ciudades, colocar filtros en los vehículos de motor diesel e impulsar la utilización de nuevos combustibles (biocombustibles e hidrógeno) que adicionalmente contribuirán a disminuir la actual dependencia del petróleo.

4.1.3. Automóvil y sostenibilidad

El automóvil tal y como se concibe hoy en día no es sostenible por:

- La emisión de gases (Protocolo de Kyoto). Los carburantes dependen en un 99% del petróleo.
- Cantidad y procedencia de los gases emitidos. Según el Observatorio de la Movilidad del Ministerio de Medio Ambiente, entre 1970 y 2000 la demanda energética del sector transporte se ha triplicado.

En España el transporte es el principal causante de gases de efecto invernadero, ya que contribuye con más del 40% al consumo de la energía primaria que, sorprendentemente, no está sujeta al Protocolo de Kyoto. La emisión de estos gases forma parte de la denominada emisión difusa.

En cuanto a la cantidad de gases emitida es sorprendente, tal y como indica el ejemplo de la Tabla 14.13, comprobar que la masa de gases emitida es 8 veces superior a los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) que genera un ciudadano.

Si el valor másico de los gases emitidos se expresa sólo en términos de CO_2, la cifra es de más de 6 kg CO_2/conductor y día, es decir 4 veces los residuos domiciliarios. En términos exclusivos de CO_2, la cantidad emitida teórica es de 223 g/km. Sin embargo la Tabla 14.14, muestra la importancia de las emisiones contaminantes de los vehículos, en la ciudad de México, cintado fuentes de Ecoengen.

Tabla 14.13. Cantidad de gases emitidos por un vehículo

Emisión de gases en vehículos		
Consumo vehículo	0,090	l/km
Kilometraje anual	10.000	km/año
Consumo anual de gasolina	900	l/año
CO_2 generado	2.228	kg/CO_2 y año
Gases emitidos	12.768	kg/gases y año
Gases emitidos por conductor	12,8	t/vehículo y año
Gases emitidos por conductor al día	35,0	kg/conductor y día
Residuos urbanos por habitante	1,6	kg/RSU/habitante y día

Así mismo, la Tabla 14.14, pone de relieve la importancia del uso de los catalizadores. Los valores que aparecen no son nada despreciable. Así, en el caso del CO (gas tóxico), 20,2 g/km equivale a 205 kg/año y vehículo, en el caso de realizar 10.000 km al año.

Tabla 14.14. Emisiones de contaminantes, en g/km, según la tecnología

	Carburador	Inyección electrónica unipunto	Inyección electrónica multipunto	Promedio general
CO (g/km)	55	36	12	20,2
NO_x (g/km)	2,3	1,7	1,0	1,3
THC (g/km)	7,1	3,1	1,2	2,4
CO_2 (g/km)	261	283	272	271

El sector del automóvil es el único que ha registrado tasas importantes de aumento de CO_2 en los últimos quince años. Los gases de los vehículos representan el 25% de las emisiones europeas.

La Tabla 14.15, muestra el análisis de los gases, húmedos y secos, que genera un automóvil estándar, sin tener en cuenta los contaminantes.

Tabla 14.15. Análisis de los gases emitidos por un vehículo

Análisis de gases (sin contaminantes)		
	Gases húmedos % volumen	Gases secos % volumen
N_2	74,3	85,0
O_2	1,8	2.0
CO_2	11,4	13,0
H_2O	12,6	0,0

De todo ello se colige que, tanto por el agotamiento del petróleo como por la cantidad de gases emitidos el modelo actual no es sostenible.

4.1.4. Automóvil, carburantes y escenario a corto plazo

Por corto plazo puede estimarse un tiempo inferior a 10 años. El incesante aumento del precio del petróleo conducirá a un valor de la gasolina inasequible. Suponiendo que el estado siga ingresando alrededor de un 50% del impuesto de hidrocarburos, una hipótesis de incremento del crudo y partiendo de un precio de venta al público de 1,1 l/€, la Tabla 14.16 indica que con estos parámetros se podría, en este lapso de tiempo, triplicar el precio de la gasolina.

Frente a ello aparece la oportunidad de los combustibles renovables, carburantes renovables o biocombustibles. Los más importantes son:

- Los bioalcoholes, o sustitutos de las gasolinas. Se fabrican a partir de azucares: caña de azúcar en países cálidos o cereales (básicamente, trigo) en países templados, como es el caso de España.
- Los biodiesel, o sustitutos de los diesel. Se fabrican a partir de plantas oleaginosas: colza, girasol, cardos, etc. España presenta grandes posibilidades en este terreno.

La Directiva de biocombustibles 2003/30/EC de 8 de mayo de 2003 referente a la promoción del uso de biocombustibles para el transporte, establece el objetivo del 2,5% de biocarburantes en el sector del transporte en 2005 y del 5,75% para el 2010. España no cumplió con la primera cita (escasamente se alcanzó el 0,4%) y, al paso actual difícilmente se logrará la meta en 2010.

Los puntos de reflexión más sobresalientes de este apartado son:

- El clima de España es propenso a la producción de ambos tipos de biocarburantes.
- Se puede presentar un cierto problema de espacio y agua. No obstante, esto no son los puntos más críticos.
- Es preciso cambiar la política de subvenciones (PAC) para fomentar el cultivo de biocarburantes. (En nuestro país hay muchos cultivos subvencionados, que se pagan a condición que no se recolecte la cosecha, como acontece con el girasol).
- Debería impulsarse una política de reducción de masa forestal (a partir de la síntesis de Fischer-Tropsch, se puede obtener carburante de la madera) y en su lugar fomentar los cultivos de biocarburantes.

Desde el punto de vista económico, la obtención de biocarburantes, al precio actual de la gasolina es rentable. El biocarburante permite un precio estable y que el impuesto estatal se mantenga, a la par que crea puestos de trabajo, reduce la factura del petróleo, ayuda a mitigar el efecto invernadero y previene el riesgo de incendios forestales.

4.1.4.1. Los impuestos en los carburantes

Los estados, tradicionalmente han visto en el empleo de los carburantes un medio ideal para la recaudación de impuestos. En el caso de las gasolinas, los impuestos en España, superan el 50%, mientras que en los gasóleos de automoción no llega.

Como deja ver claro la Figura 14.28, el coste real de la gasolina que podría ponerse en el mercado es del orden 0,48 €/l, el resto son impuestos. Ello explica el porque en otros países, como EE UU, el precio puede ser tan bajo.

A corto término, estando los rendimientos de los automóviles convencionales al límite, la única manera de ahorrar dinero va ligada a la reducción del consumo y por ello se han desarrollado nuevas tecnologías como los vehículos híbridos.

Con esta denominación se hace referencia a los vehículos que cuentan con más de una fuente de

Tabla 14.16. Estimación de la evolución del precio de venta de la gasolina en 10 años

Estimación evulución del precio del carburante									
Año	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
Aumento anual (%)	10	10	10	10	15	15	15	15	15
Precio del barril (US$/barril)	77	85	93	102	118	136	156	179	206
Precio de gasolina (€/l)	1,20	1,32	1,46	1,60	1,84	2,12	2,44	2,80	3,22

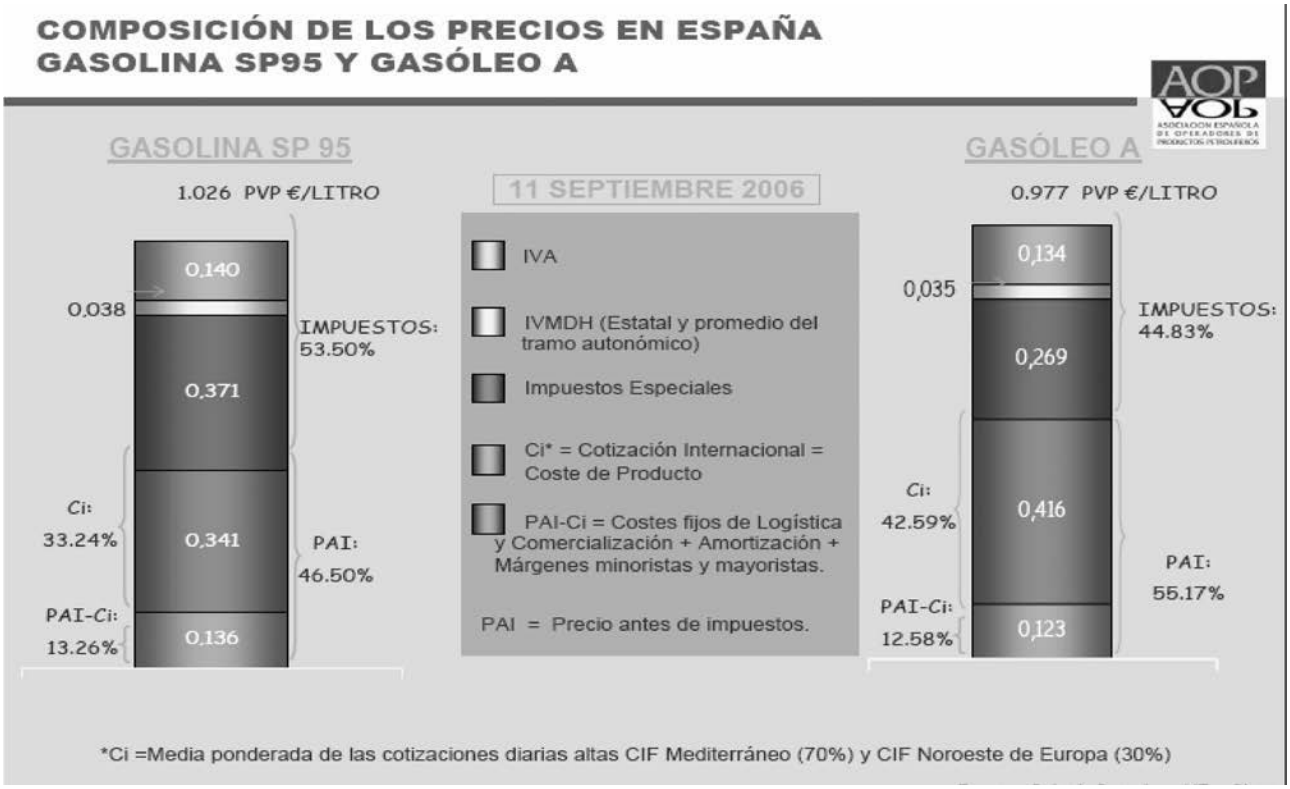


Figura 14.28. Desglose del precio de los carburantes.

energía, en este caso motor eléctrico además del de combustión interna. Los motores eléctricos, cuando hay uno por rueda tractora, ofrecen una mayor eficiencia en la transmisión de potencia del motor a las ruedas (~100% frente a 90%) y recuperan la energía de frenado en baterías (10% de ahorro), que en los convencionales se disipa y pierde.

Los vehículos híbridos suelen ser más ligeros, de ruedas con menor rozamiento (más estrechas y duras) y más aerodinámicos. Actualmente existen modelos con motores térmicos con alternador para generar electricidad y baterías para aprovechar la energía de frenado. Algunos pueden arrancar y circular un poco sólo con la batería (*full hybrid*) y otros necesitan arrancar con el motor térmico. A velocidades elevadas, pendientes o aceleración siempre es necesario el motor térmico. Es una tecnología en desarrollo con continuos avances.

En España, en 2006, la fiscalidad del automóvil reportó al estado 22.180 millones de euros, donde algo más de la mitad lo constituye el impuesto especial sobre carburantes, para un parque de 36 millones de vehículos de todo tipo. La administración se halla atrapada en la disyuntiva de incrementar los impuestos (o mantenerlos) o bien disminuirlos a base de favorecer el empleo de biocarburantes. Una parte de los expertos echan por el camino de en medio basando o ligando el impuesto en relación a la emisión de CO_2 por kilómetro recorrido. Así, la mejora de los diseños ha permito reducir los consumos desde el 1994 al 2004 de:

- 1994: Gasolina 182 g CO_2/km, diesel 175 g CO_2/km, a
- 2004: Gasolina 165 g CO_2/km, diesel 152 g CO_2/km

Estos valores de ahorro del 10% en las gasolinas y del 15% en el caso del diesel han supuesto, obviamente, una disminución muy importante en la emisión de CO_2. Sin embargo, la UE propugna que la mejor vía de ahorro estriba en el uso de los biocarburantes. Las semillas para la fabricación del biodiesel proceden, básicamente, de Brasil y Argentina, lo que encarece la fabricación, por ello el estado se compromete a suprimir el impuesto especial sobre carburantes, al menos de momento, de forma que el biocarburante iguale el precio de venta del gasóleo en los surtidores que, en 2006 había 1.000 en España, que expendían biodiesel.

4.1.5. El automóvil del futuro a medio plazo

El uso masivo de biocombustibles tiene también sus límites. Se considera que su introducción precederá a la del hidrógeno, el metanol y las pilas de combustible.

Los motores de explosión, ya sean en la versión diesel, energéticamente más eficientes, o de ciclo Otto (gasolina) presentan unos rendimientos bajos (transforman la energía química en mecánica) y como que el consumo de carburantes seguirá en aumento, puede convertir el sistema en inestable. Por ello es preciso un cambio de modelo en el propio vehículo.

El futuro del automóvil mira hacia la pilas de combustible. Ésta consiste en un sistema que transforma directamente el potencial químico en electricidad, por lo que su rendimiento es muy elevado. La Figura 14.29 muestra el principio de funcionamiento de una pila de combustible.

Por el momento, ya existen vehículos accionados por pilas de combustible en fase experimental. El problema actual es la obtención del hidrógeno a precio razonable, para ello es preciso recurrir a las energías renovables.

No obstante hay otra vía que estriba en el empleo de pilas de metanol, ahora en fase muy experimental. El metanol, a diferencia del hidrógeno, es un líquido, lo que permitiría mantener la infraestructura de la gasolina y el depósito de combustible de los coches, si bien la concepción de la tracción de los mismos será completamente diferente:

- Coches serán completamente silenciosos (de hecho serán coches eléctricos).
- Automóviles no contaminantes. Lo único que emitirán será vapor de agua.
- Vehículos mucho más eficientes, lo que significa menos combustibles.

El incremento de los precios del petróleo unido a los problemas ambientales derivados de la emisión de los gases de efecto invernadero y del aumento global del número de vehículos ha obligado a las autoridades ambientales a forzar a los fabricantes de automóviles a reducir los consumos energéticos. En 1996, la UE se fijó el objetivo de reducir, para 2012, la emisión hasta 120 g CO_2/km en los coches que se fabriquen a partir de este año (los expertos auguran un incremento de un 18% en los costes de fabricación para los modelos pequeños). En 2006, la emisión media de los vehículos fabricados era de 163 g CO_2/km en base a los logros técnicos, que se resumen en los siguientes valores:

- Vehículo de gasolina: consumo medio 165 g CO_2/km.
- Vehículo diesel: consumo medio 152 g CO_2/km.
- Vehículo híbrido: consumo medio 95 g CO_2/km.
- Vehículo de bioetanol: consumo medio 60 g CO_2/km.

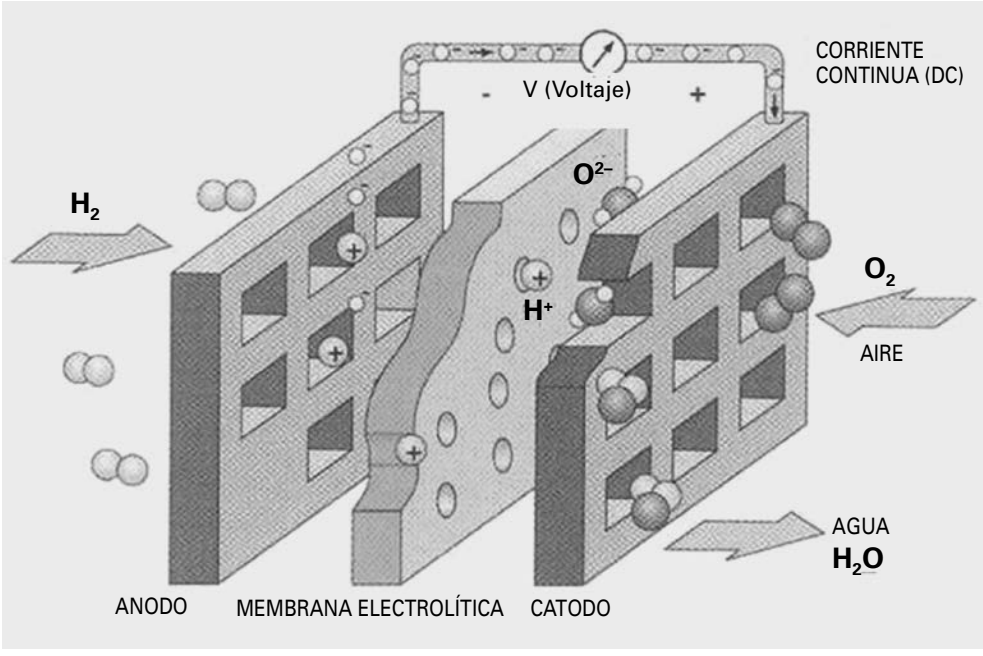


Figura 14.29. Principio de funcionamiento de una pila de combustible de hidrógeno.

- Vehículo de biodiesel: consumo medio 40 g CO_2/km.

Frente a estos consumos es preciso hacer unas observaciones especialmente importantes desde la óptica ambiental. En los tres primeros casos hay que tener presente el consumo adicional de la extracción, transporte, refino y distribución del carburante, lo que en terminología inglesa se denomina «*Well-to-wheel*», es decir consumo equivalente desde el pozo (*Well*) hasta la rueda (*Wheel*). Valorando estos conceptos, los consumos reales deberían incrementarse en un 21%. Así pues, un vehículo moderno (de 2006) accionado a gasolina tendría un consumo de 200 g CO_2/km. Es decir, un vehículo que recorra 10.000 km/año emitirá 2 toneladas de CO_2 de origen fósil a la atmósfera al año.

Mientras que un vehículo que funcione con etanol, a partir de caña de azúcar, emitirá tan solo 60 g CO_2/km, el resto hasta llegar a los 160 g CO_2/km (que es el consumo específico para este carburante), serán absorbidos por la planta. En teoría si se lograra compensar toda la energía de la logística (cultivo, recolección, transporte, fabricación y distribución) a base de energía renovable, la emisión de CO_2 sería nula. Admitiendo que la energía para su fabricación sea de origen fósil, un vehículo accionado con bioalcohol que recorra 10.000 km/año emitirá 0,6 toneladas de CO_2 de origen fósil a la atmósfera. O sea, el ahorro neto, con respecto a la gasolina convencional es de 1,4 toneladas de CO_2 por vehículo y año.

Como se ve el ahorro a escala mundial es importantísimo. No obstante, a medio plazo tampoco va a ser sostenible, por lo que la humanidad se verá abocada a la economía del hidrógeno. Siguiendo con el ejemplo anterior, un vehículo accionado con pila de hidrógeno, donde el hidrógeno es obtenido con energía renovable y la pila de combustible responda a la tecnología disponible en 2006, la logística antes citada supone un consumo de 30 g CO_2/km. Así pues, el vehículo accionado con pila de hidrógeno tan sólo emitirá 0,3 toneladas de CO_2 de origen fósil a la atmósfera.

Por lo que hace referencia a la mejora del rendimiento de los consumos específicos en los vehículos accionados con motores de combustión interna, los especialistas prevén que a corto término, las reducciones de carburante serán proporcionales a:

- 40% como consecuencia de las mejoras en los sistemas de combustión.
- 24% por la aplicación de sistemas híbridos.
- 20% por la introducción de mecanismos de control avanzado de conducción.
- 7% debido a una mejor eficiencia de los neumáticos.
- 6% por la reducción del peso de los vehículos.
- 3% por la mejora de la aerodinámica.

Este ahorro energético deberá aplicarse tanto a los vehículos movidos por carburantes derivados del petróleo como a los accionados por biocarburantes. Además, desde el punto de vista ambiental, hay que valorar las importantes reducciones de contaminantes, al margen del CO_2, que todo ello conlleva.

En el mundo de la automoción, como en otros, la propaganda, los anuncios, las grandes ferias marcan una «doctrina» que parece indiscutible. Así, aspectos que los medios de difusión suelen comentar, en referencia a la automoción, son:

- Problemas de tráfico. Accidentes, aparcamiento, multas.
- Precio de los combustibles. Sobre todo lo que afecta a los impuestos.
- La espectacularidad de los salones del automóvil o las carreras de fórmula 1 o motos.

Por lo general nadie parece dispuesto a mirar estas preguntas en «negativo»:

- ¿El modelo de infraestructuras que tenemos es el adecuado? ¿Por qué no se fomenta más el transporte público? La tracción eléctrica no precisa de carburantes convencionales.
- ¿Por qué no se exige el impuesto de «Kyoto» a las gasolinas, si son el primer causante de los gases de efecto invernadero? ¿Qué pasaría con el precio de los carburantes si se le aplicara los derechos de emisión de CO_2?
- ¿Por qué los estados, sin renunciar a los impuestos de hidrocarburos, no impulsan las políticas de promoción de los biocarburantes? ¿Estarán dispuestas las multinacionales del petróleo a mantener, que no a renunciar, a sus multimillonarios ingresos?
- Partiendo de la base de que el «*peak oil*» se producirá en 15/20 años, porque nadie se atreve a decir como evolucionará el precio de los carburantes?

Los medios de difusión están llamados a tener un papel fundamental en la difusión y educación ambiental de nuestra sociedad para procurar que una herramienta tan necesaria como el coche pase de ser una amenaza a un bien de consumo cómodo y sostenible.

4.2. SEPARADORES DE METALES

Existen innumerables sistemas de separación de metales, pero el problema aparece cuando se trata de recuperar metales, básicamente envases y embalajes, metálicos mezclados en un flujo de residuos.

Un primer sistema obedece al principio de recuperación de envases de aluminio (se supone que los magnéticos han sido previamente separados) de los de plástico. El sistema se basa en un detector de metales que da una señal a un eyector de aire comprimido.

La Figura 14.30, basada en el mismo principio, separa los componentes metálicos del vidrio. El sistema está diseñado para eliminar los metales presentes en el interior de los cascotes de vidrio.

4.2.1. Separadores/clasificadores por aire

La Figura 14.31 muestra la separación típica de componentes magnéticos por medio de una cinta a la que se le ha acoplado un electroimán. Este sistema es profusamente utilizado en la industria del reciclaje.

El otro sistema, representado en la Figura 14.32, es un clasificador neumático. El residuo es dosificado por medio de una válvula alveolar en un conducto a depresión cuya sección (garganta) es ajustable. Los materiales densos caen ya que por su peso no pueden ser succionados por la corriente de aire. Los materiales livianos son separados en un ciclón.

Existe una tercera categoría de clasificadores que son las tablas densimétricas. En esencia son unas cribas (mesas equipadas con una superficie de tela metálica perforada) dispuestas con una cierta inclinación y animadas de un movimiento vibratorio. A la vez la superficie esta barrida por una fuerte corriente de aire que succiona los materiales livianos. La combinación de ambos efectos consigue un excelente sistema de clasificación.

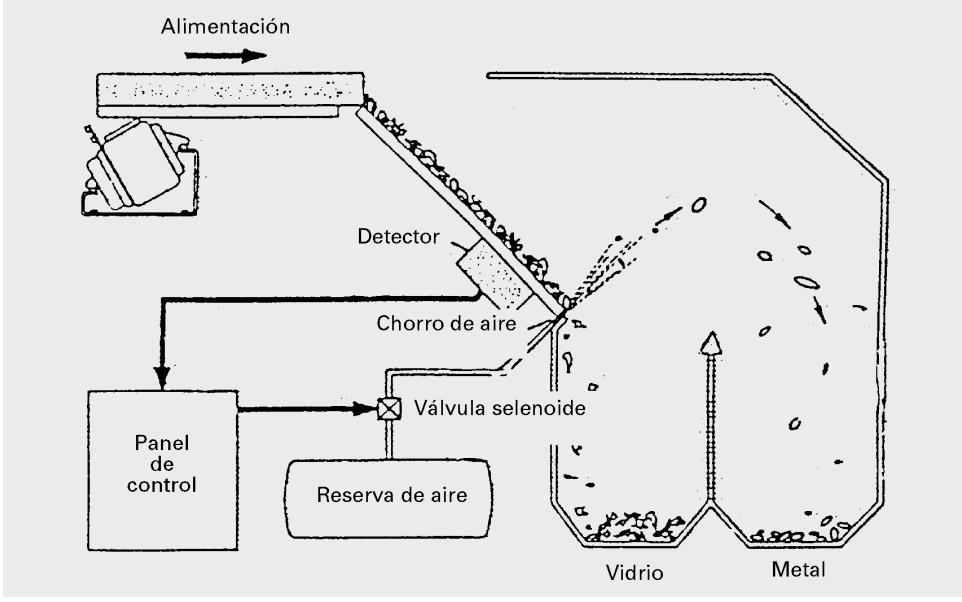


Figura 14.30. Separador de vidrio.

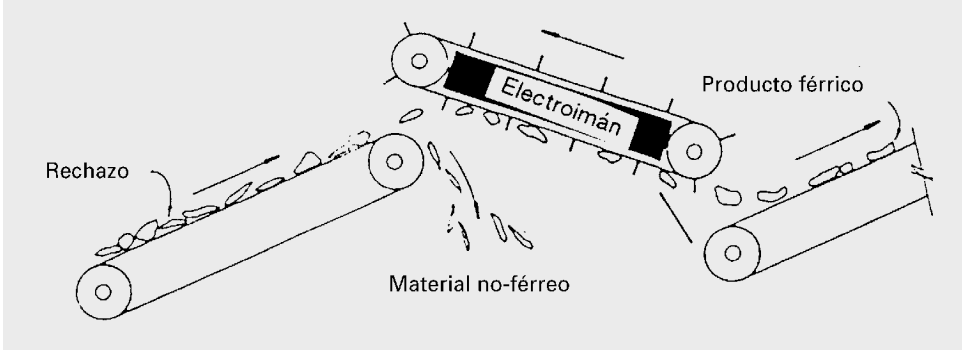


Figura 14.31. Separador de metales férricos.

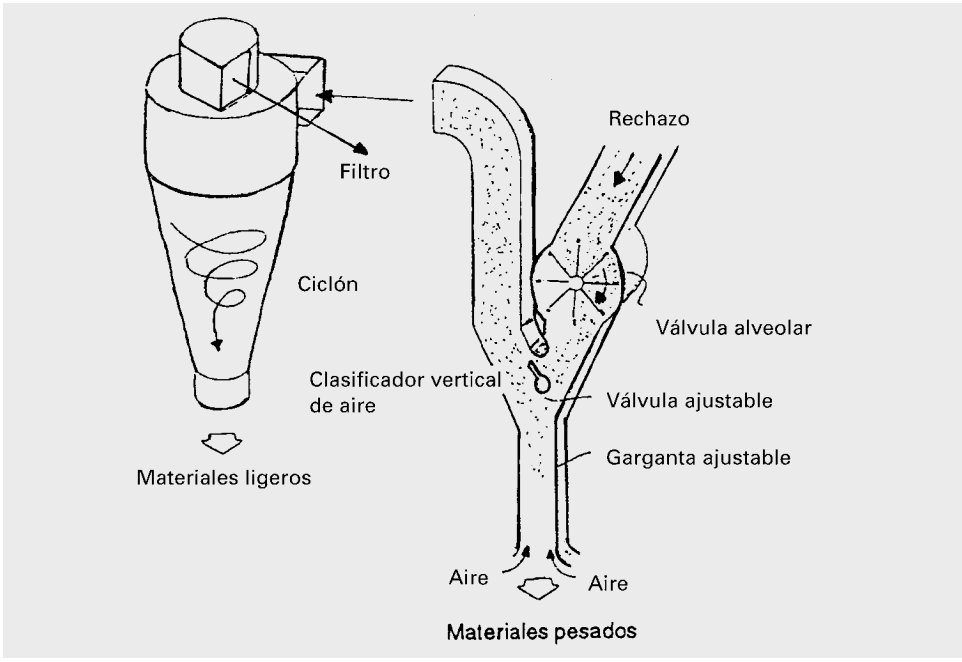


Figura 14.32. Clasificador neumático.

4.2.2. Separador de metales no férreos

El primer sistema, representado en la Figura 14.33, se basa en la inercia de los materiales gracias a la energía cinética proporcionada por una cinta transportadora que en su tambor dispone de un electroimán. El sistema no es muy exacto ya que parte de la base de que los metales férreos siempre son más densos que los materiales no-férreos.

El segundo sistema es más exacto, ya que se basa en las corrientes de Eddy. El principio de funcionamiento estriba en las fuerzas de repulsión entre un campo magnético rotativo y la corriente inducida que este campo crea en el interior del material conductor no-férreo. En los no-metales sólo actúa la gravedad. Ello tiene una gran aplicación en la clasificación de las escorias de las incineradoras de RSU.

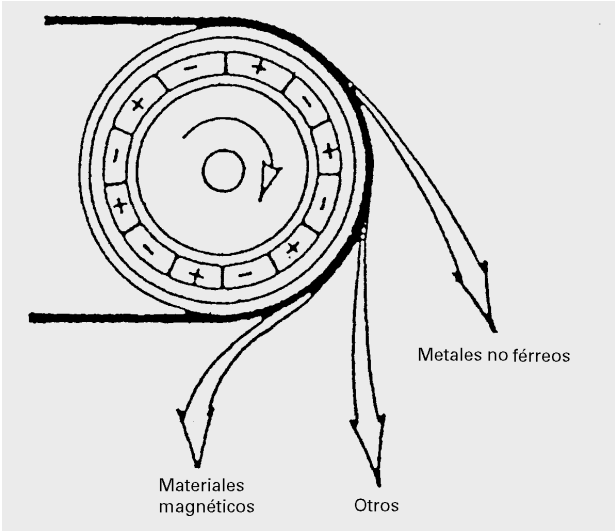


Figura 14.34. Separador por corrientes de Eddy.

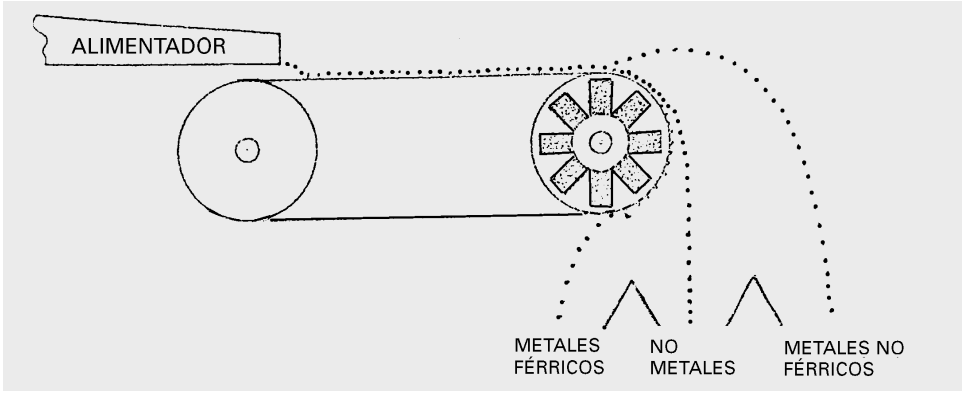


Figura 14.33. Clasificador de metales.

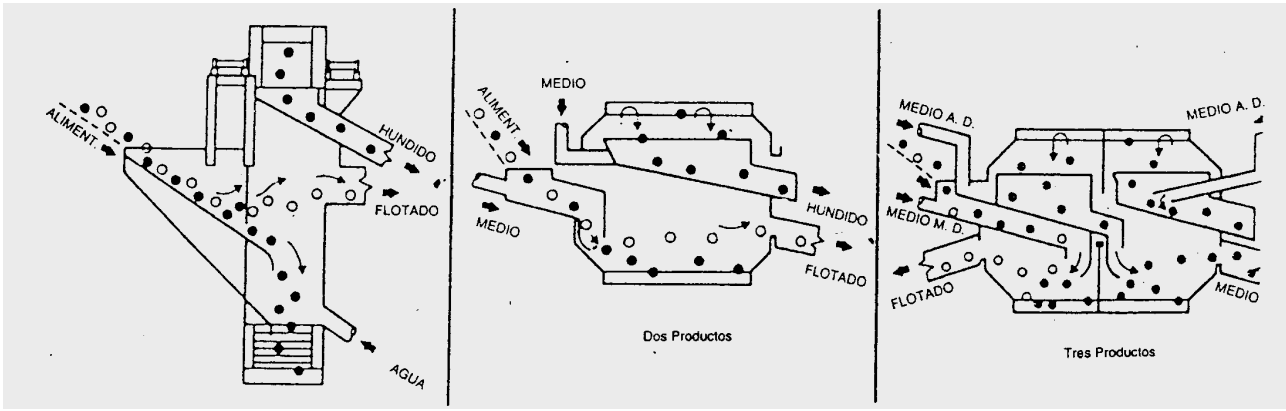


Figura 14.35. Separador densimétrico.

Recuperación de chatarras no férreas

La Figura 14.35 muestra diversos sistemas gravimétricos empleados en el reciclaje de chatarras integrales no férreas.

La Figura 14.36 muestra el esquema de un proceso de recuperación, por separación de chatarras no férreas mediante técnicas combinadas de trituración/clasificación y concentración.

En el DVD adjunto, en el punto 4, se muestra información suplementaria sobre sistemas de recuperación y separación de chatarras férreas y no férreas.

4.2.3. Métodos de eliminación de metales contenidos en efluentes

La Tabla 14.17 resume las principales vías de tratamiento de metales contenidos en los efluentes así como sus principales ventajas e inconvenientes.

4.3. VEHÍCULOS FUERA DE USO

La problemática del reciclaje de vehículos

Los residuos procedentes de los automóviles usados, constituyen una verdadera preocupación para las autoridades medioambientales por diversos motivos:

- El vehículo fuera de uso se materializa mediante un residuo voluminoso y pesado.
- Es un residuo muy abundante con un potencial contaminante muy alto y un fuerte impacto medioambiental.

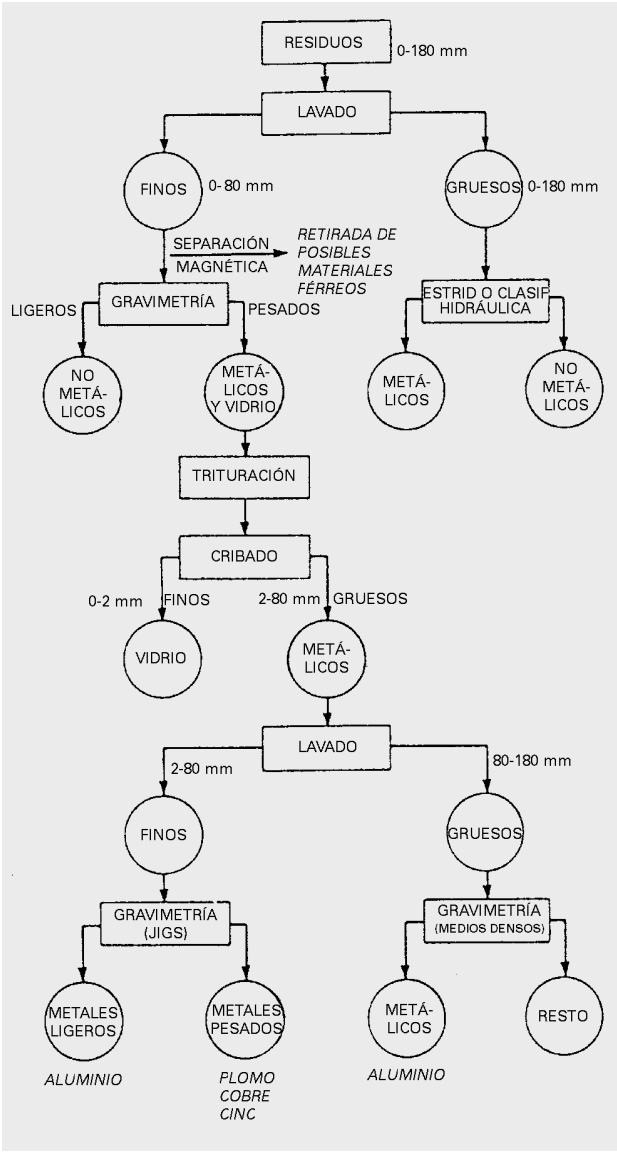


Figura 14.36. Esquema de separación de metales.

Tabla 14.17. Métodos de tratamiento de metales

Técnica	Ventajas	Desventajas
Precipitación	Equipo sencillo. Muy eficaz para concentraciones algo elevadas. Coste bajo.	Lodos voluminosos y difíciles de deshidratar. Disminución de la eficacia en presencia de agentes complejantes, salvo en la precipitación por adición de sulfuro. Concentraciones residuales algo elevadas. A menudo se requiere el empleo de una segunda técnica que rebaje diconcentraciones.
Coagulación/ Floculación	Equipo sencillo. Coste más elevado que en la precipitación, sobre todo si se utilizan agentes floculantes sintéticos.	Lodos voluminosos. Eficacia algo inferior a la precipitación.
Flotación	Equipo sencillo. Pequeños volúmenes de lodos. Gran eficacia de eliminación. Costes ligeramente superiores a la precipitación con cal.	No es eficaz para concentraciones superiores a 50 mg/l.
Cementación	Equipo sencillo. Recuperación de los meta!es. Coste medio/bajo.	Eficacia baja. Concentraciones residuales elevadas. No es eficaz a pH > 3. Se hace necesario eliminar el catión Fe (II). Es un método restringido a metales más oxidantes que el Fe.
Complejación	Equipa sencillo. Posibilidad de recuperación selectiva de metales. Coste medio.	Utilizar en conjunto con otra técnica.
Intercambio iónico	Equipo muy compacto No se generan lodos. Recuperación de los metales. Concentraciones residuales muy bajas. Coste medio.	Vida limitada de las resinas. No resulta económico si la concentración de metales es elevada (> 50 mg/l).
Extracción con disolventes	Equipos compactos, más complejos que para el cambio iónico. No se generan lodos. Posibilidad de recuperación selectiva de metales. Coste medio.	Limitada capacidad de concentración.
Adsorción	Equipo sencillo No se generan lodos. Recuperación de las metales. Coste bajo.	No es eficaz para concentraciones superiores a 10 mg/l. La formación de complejos puede disminuir la eficacia.
Destilación	Recuperación de los metales. No se requiere adición de sustancias extrañas.	Proceso con gran consumo energético. Equipo algo complejo. Elevados costes de instalación y operación. Su empleo queda restringido para concentraciones elevadas.
Métodos electroquímicos	Recuperación de los metales. Eficaces incluso cuando los metales están formando complejos. No requieren adición de sustancias extrañas. Volumen de lodos muy inferior al obtenido en la precipitación.	Polarización catódica si el efluente es diluido. Costes de instalación y de operación elevados.
Procesos de separación con membranas	No requieren adición de sustancias extrañas.	Compactación y deterioro de membranas. Escasa selectividad.

- Es un residuo complejo ya que se compone, a su vez, de un conjunto de residuos líquidos, gaseosos y sólidos.
- La logística de recogida es cara y complicada (trámites administrativos y dispersión geográfica).

En la actualidad el tratamiento se reduce a dos opciones básicas, que esencialmente son la fragmentación y el desguace selectivo.

Según datos de la Comisión Europea, se estima que entre 8 y 9 millones de vehículos son desechados cada año en Europa. En España, esta cifra alcanza

los 700.000 vehículos aproximadamente. Alrededor de un 7% de VFU son abandonados, sin tratamiento, en la UE que se transforman en más de ocho millones de toneladas de residuos que provienen de los desguaces.

4.3.1. Fragmentación

Como muestra el esquema de la Figura 14.37 consiste en introducir el vehículo, tal como llega a la planta de tratamiento, en una línea de trituración y separación de materiales elementales (acero, orgánicos, no-férreos,...) la separación puede llegarse a sofisticar pero no puede evitar la contaminación de los productos, ni los riesgos de incendio y explosión debido a los residuos inflamables que contiene (carburantes, aceites, etc.).

El material que más ha aumentado en proporción, de los que constituyen los vehículos, es el aluminio. En la actualidad la tasa de recuperación del aluminio contenido en los VFU es del 95% y dos tercios del aluminio utilizado para la fabricación de los automóviles provienen de la fusión secundaria del aluminio. La tecnología de separación de metales tras la fragmentación se ha desarrollado mucho. En Barcelona, la empresa Viuda de Lauro Clariana, consigue separar perfectamente el cobre, el aluminio y el acero inoxidable del caudal de residuos, con una fiabilidad superior al 90%.

4.3.2. Desguace selectivo

Es la solución deseable técnica y medioambientalmente, ya que se separan y recuperan casi todos los componentes pero tiene un coste elevado, puesto que la mano de obra que interviene es muy intensiva.

4.3.3. Reciclaje de vehículos fuera de uso

Durante su vida útil el vehículo provoca una serie de impactos como la contaminación atmosférica, la acústica, etc., que con la evolución de la tecnología se han reducido de manera ostensible. No puede decirse lo mismo con el automóvil cuando llega al fin de su vida útil.

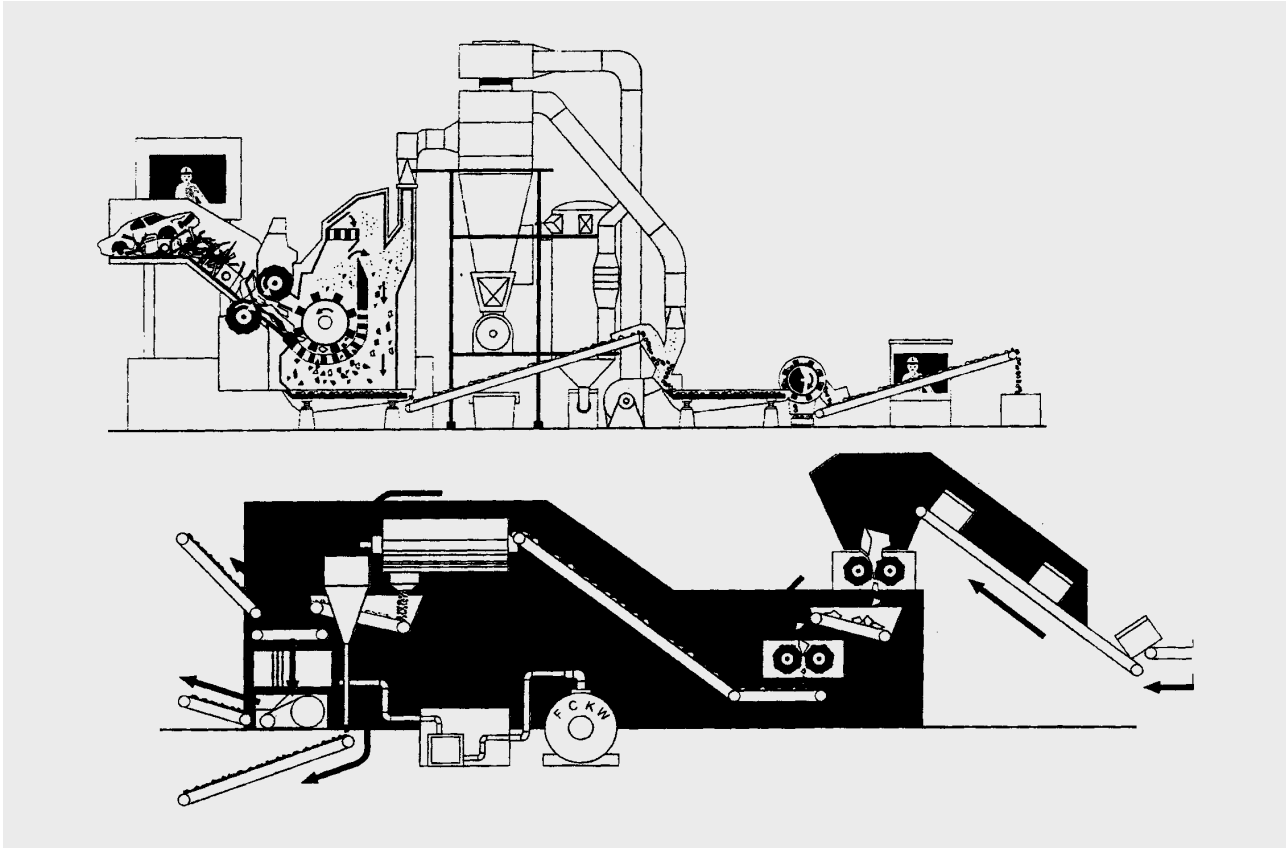


Figura 14.37. Fragmentadora de vehículos.

Un automóvil fuera de uso está constituido por un conjunto de residuos muy complejos y, hasta la fecha, en el diseño de los vehículos no se ha contemplado su reciclaje; si bien ante una presión ambiental cada vez más evidente, algunas marcas han comenzado a diseñar vehículos para que puedan ser fácilmente desmontables y reciclables, cuando se hallen fuera de uso.

La Figura 14.38 muestra las fases de desmontaje y aprovechamiento de los automóviles.

Otro factor importante es la reducción del peso total y la distribución de materiales en función de los diseños sucesivos, ilustrado en la Tabla 14.18.

Tabla 14.18. Composición de un vehículo

Componente	Año 1983	Año 2000
Peso total (media)	840	650
Acero y fundición %	51,1	23,5
Plásticos %	16,6	26,3
Caucho%	14,0	4,6
Aluminio %	13,1	27,6
Varios %	5,0	11,1
Magnesio	—	6,6

4.3.4. Residuos líquidos en el automóvil fuera de uso

Los residuos líquidos procedentes de los vehículos, cuando son vertidos al medio, ocasionan un fuerte impacto ambiental debido a su naturaleza. Y si bien el combustible sobrante se puede recuperar íntegramente, el refrigerante tiene un impacto más limitado, mientras que los aceites representan un mayor problema. La Figura 14.39 reproduce, a nivel del estado español, el tratamiento llevado a cabo sobre el aceite, para una cantidad de 220.000 t.

Un vehículo medio en la planta de desguace arroja la cantidad media de líquidos de 27,0 kg. Hay que hacer notar que cuando el vehículo se abandona los líquidos son los primeros es escaparse y su capacidad de contaminación es elevadísima. Es por ello que en toda práctica de desmontaje es a ellos a los que debe prestarse la primera atención.

De todos los líquidos el más común es el aceite del motor, ya que es usual cambiarlo varias veces durante la vida del vehículo. Este aceite es muy contaminante por cuanto contiene toda una serie de compuestos químicos tóxicos que se han degradado térmicamente con el uso y un sinfín de metales pesados incorporados con la fricción. Se calcula que un

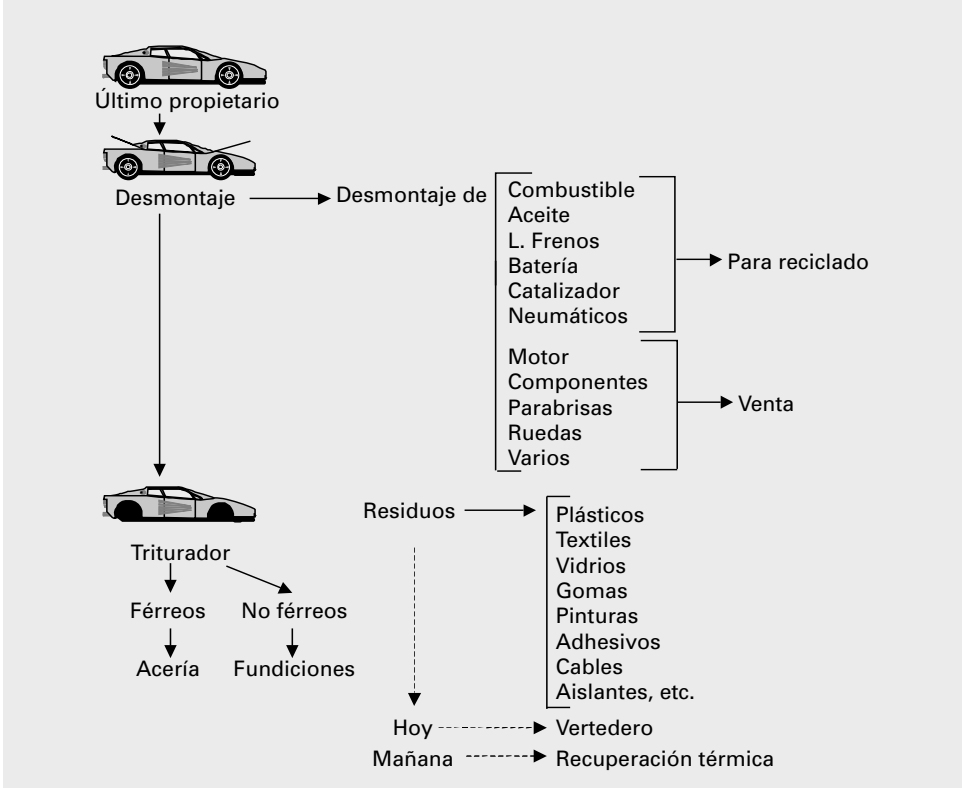


Figura 14.38. Fases de desmontaje de vehículos.

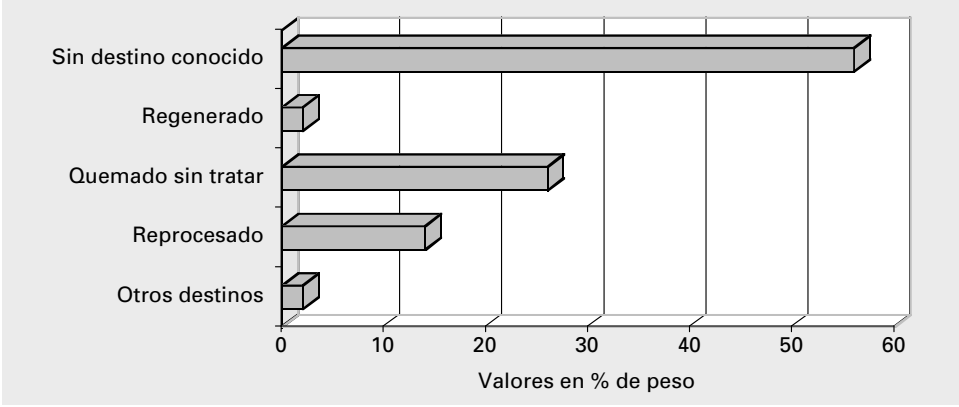


Figura 14.39. Destino del aceite de automoción.

litro de aceite usado puede llegar a contaminar un millón de litros de agua.

La Figura 14.40 muestra la cantidad de aceite mineral recogido en Cataluña por Cator, la empresa que, en régimen de monopolio gestiona los aceites en esta comunidad. En otras regiones de España lo usan en motores de cogeneración y generan electricidad.

A escala mundial entre el 30-40% del aceite se regenera y el resto se convierte en materias primas para la industria química y se quema en plantas de producción eléctrica.

4.4. LOS CATALIZADORES AGOTADOS

Los catalizadores de automóvil están constituidos de platino, paladio y rodio, tres metales preciosos de elevado precio. El soporte del catalizador es metálico (ver Figura 14.26) o, más recientemente, cerámico.

Como sea que el soporte cerámico presenta un elevado punto de fusión para la recuperación se usa un horno accionado con plasma. La antorcha concentra una gran cantidad de calor (la temperatura de la cámara oscila de 1.450 a 1.700 °C) en la solera del horno lo que provoca la fusión del residuo (catalizador y soporte).

El soporte, más liviano se evacua por la parte superior del baño y los metales preciosos por la inferior, que más tarde se separan por métodos químicos convencionales.

Por este sistema, sólo en Europa, se recuperan 20 t/año de los tres metales preciosos antes citados.

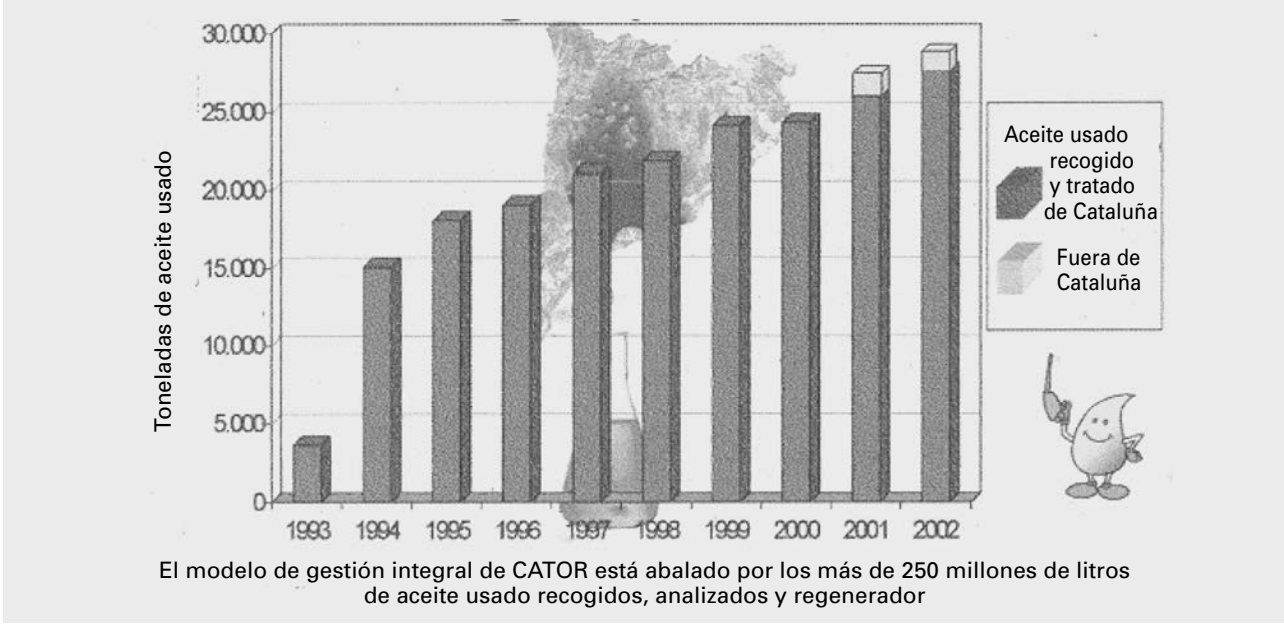


Figura 14.40. Valorización del aceite de automoción en Cataluña.

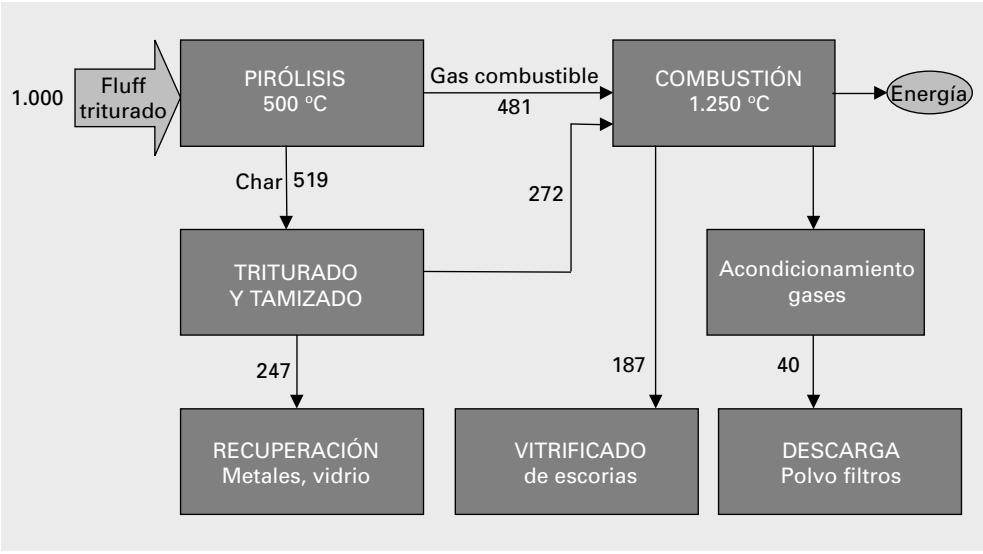


Figura 14.41. Valorización energética del «fluff».

4.5. VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE LOS RESIDUOS DE VFU

Los neumáticos permiten diversas valorizaciones energéticas. Teniendo en cuenta su notable poder calorífico (aproximadamente, 7.500 kcal/kg) y el del «fluff» (3.100 kcal/kg), vale la pena hacer una reflexión.

Las normativas internacionales señalan unos límites de emisión para los combustibles convencionales pero utilizan un baremo diferente para los residuos-combustibles.

Desde la óptica medioambiental esta discriminación no tiene lógica. En la práctica ello obliga a una combustión más ajustada de los «otros» combustibles, atendiendo al hecho de que las características de los residuos pueden alterarse sin previo conocimiento.

La Figura 14.41 muestra la recuperación energética de una mezcla de caucho y «fluff».

4.5.1. La valorización del «fluff»

Una vez «secado» el vehículo (retirados los líquidos), se separan los componentes aprovechables (en las plantas de tratamiento actuales, los neumáticos son de las pocas cosas que se separan) y el resto se tritura.

Con ello se obtiene un «fluff» cuya composición media es la indicada en la Figura 14.42 (nótese que en esta composición no hay neumáticos. No obstante, en otros «fluff's» de acuerdo con la planta que lo genera, si hay neumáticos). Este material tiene un poder calorífico muy alto ya que, a excepción del vidrio y el metal, el resto es combustible. En la actualidad ya existen plantas para la valorización energética del «fluff».

En relación con la conservación de los recursos, el reciclaje del caucho sólo tiene un papel secundario, puesto que su cantidad no alcanza el 1% del consumo de petróleo, del cual, nada menos que el 86% es quemado directamente para generación de energía.

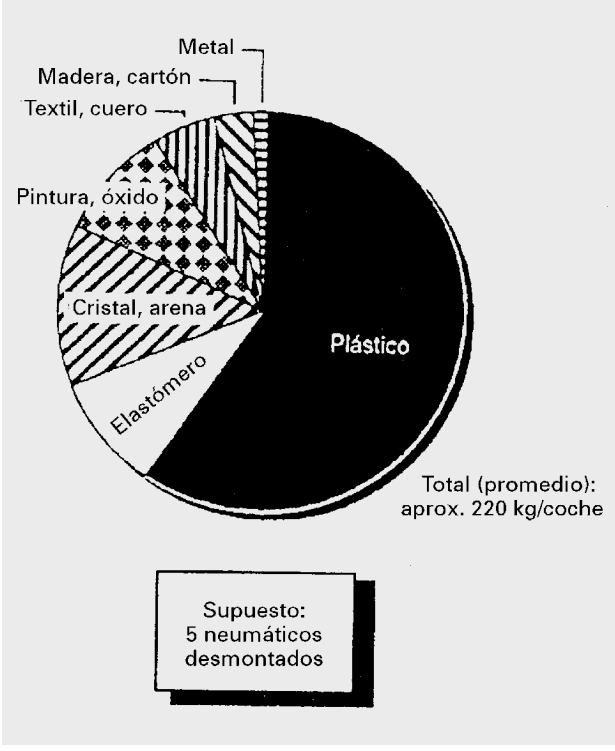


Figura 14.42. Composición típico de un «fluff».

Al existir una mezcla de orgánicos e inorgánicos muchos países se han decantado por soluciones de valorización energética seguidas de vitrificación y/o fusión de escorias.

4.5.2. Los plásticos del automóvil

Como muestra la Figura 14.43 en los vehículos se ha incorporado progresivamente una mayor cantidad y variedad de plásticos. El problema aparece cuando el automóvil deviene residuo.

La Figura 14.44 muestra que en un modelo normal de automóvil pueden coexistir más de 13 tipos de plásticos diferentes.

Dada la imposibilidad técnica, por el momento, de reciclar tal cantidad de tipos de plástico las tendencias apuntan a la valorización energética.

El Capítulo 13 de la presente obra, amplia este apatado.

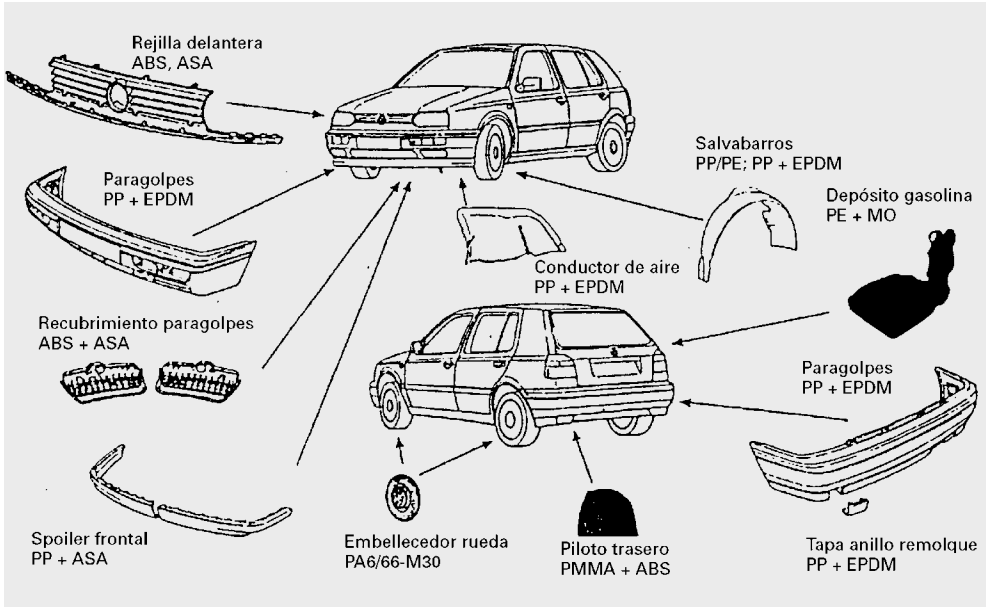


Figura 14.43, Distribución ordenada de plásticos (VW Golf CL 1992).

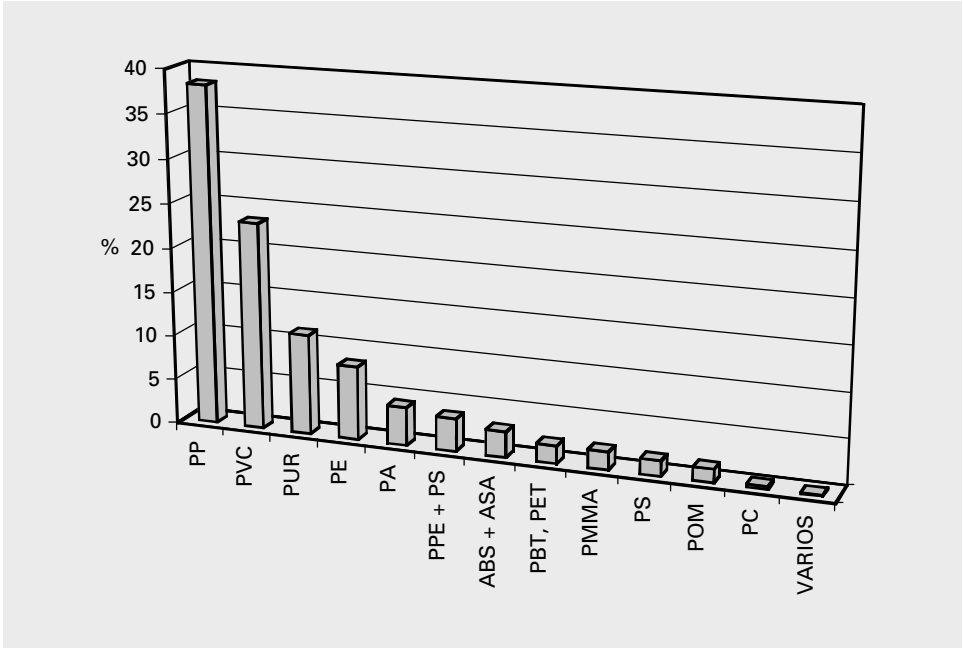


Figura 14.44. Tipos de plástico de un vehículo.

5. Valoración de neumáticos fuera de uso

La prohibición del vertedero como herramienta en la gestión de los neumáticos usados, unido a la dificultad de gestión y elevado impacto ambiental que presenta, lo ha convertido en un residuo muy estudiado y ciertamente polémico en los últimos años. La importancia de este residuo es elevada debido a:

- Su baja degradabilidad.
- Ocupan un espacio considerable, debido al elevado volumen que le confiere su forma y a su escasa densidad.
- Son difícilmente compactables y al ser elásticos provoca inestabilidad en los vertederos.
- Presentan riesgo de incendio, con importantes impactos asociados.

Desde el mes de octubre de 2006, en las facturas de compra de los neumáticos aparece un una partida correspondiente al sobrecoste que supone el tener que buscar otras alternativas al vertido, ya que esta vía se halla prohibida desde el mes de junio del mismo año.

En 2005 España generó 35 millones de neumáticos usados, lo que equivale a unas 300.000 toneladas. La Dirección General de Tráfico, ente dependiente del Ministerio de Fomento en colaboración con el Ministerio de Medio Ambiente ha propuesto, después de comprobar el comportamiento de los 200 km de carreteras asfaltadas con polvo de neumático, emplear dicho residuos para la construcción de más vías.

De acuerdo con las estadísticas de OFICIMEN, la generación de NFU, en España, en 2005, fue de 303.118 t, que se gestionaron de la siguiente manera:

- Recauchutado: 38.278 t.
- Material reciclado: 41.000 t.
- Valorización energética: 50.240 t.
- Vertido: 158.610 t.
- Exportación: 14.900 t

Lamentablemente, como muestra la estadística, el 50% de los NFU, se depositaron en vertedero.

5.1. COMPOSICIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS NEUMÁTICOS

La complejidad de la forma y de las funciones que cada parte del neumático tiene que cumplir se traduce también en una complejidad de los materiales que lo componen. El principal componente del neumático es el caucho: casi la mitad de su peso.

La fabricación del neumático, típico composite, es muy compleja y bajo esta denominación se incluyen los destinados a bicicletas, motocicletas, turismos, camiones, maquinaria agrícola, a obra pública, etc. No obstante, todos ellos tienen unos componentes comunes. La relación siguiente indica el compuesto básico y, seguidamente, los principales ingredientes de dichos compuestos:

- Caucho: Caucho natural, caucho sintético.
- Agente de vulcanización: Azufre o vulcanizante orgánico.
- Aceleradores de la vulcanización: Aceleradores tipo tiozoles.
- Promotores: Óxidos de zinc, ácido esteárico.
- Antioxidantes: Aminos, fenoles, ceras, etc.
- Fibras de refuerzo: Textiles, acero.
- Cargas: Negro de humo, sílice
- Plastificantes: Aceites minerales.

El caucho utilizado en los neumáticos es de muy diferentes tipos: caucho natural, estireno-butadieno, polibutadieno, polisoprenos sintéticos, etc., con propiedades muy diferentes, necesarias en cada caso para el trabajo de cada parte del neumático, pero también con una característica en común: todos componen, una vez vulcanizados, largas cadenas moleculares formadas por átomos de hidrógeno y de carbono unidos bajo una determinada estructura y entrelazadas con puentes de azufre. Esta estructura tan estable hace que necesiten tiempo largísimo para su degradación.

Otro componente significativo de los neumáticos son las cargas de refuerzo, y de éstas la más utilizada hasta ahora es el negro de carbono: finísimas partículas de carbono obtenidas por la combustión parcial de gas natural o aceites de petróleo gasificados. Hasta ahora, el negro de carbono representa aproximadamente la cuarta parte en peso de un neumático de turismo.

Aceites minerales, procedentes del petróleo, componen las cargas plastificantes disueltas en la masa de goma pero sin reaccionar con ella. El azufre es el agente vulcanizador por excelencia; cumpliendo el objetivo de entrelazar los polímeros, sólo puede liberarse si la goma vulcanizada se degrada o se quema, lo cual puede afectar al entorno si la transformación no se produce de manera controlada. Para la elección de las mejores opciones de tratamiento ha

de tenerse en cuenta esta presencia de azufre entre los componentes del neumático.

Como la reacción entre el azufre y el caucho en la vulcanización es muy lenta, para acelerar la fabricación se utilizan pequeñas cantidades de sustancias para acelerar o activar el proceso. Una de ellas es el óxido de zinc, metal difícilmente sustituible en la actualidad por otros materiales activadores.

Existen otros productos que entran en la composición de los neumáticos, como antioxidantes o antiozono, retardantes, adhesivos para la unión de metal o textil con la goma, peptizantes, etc. Todos estos agentes, azufre, óxido de zinc, resinas de petróleo, sílice, etc., pueden participar aproximadamente en un 1% del peso. El resto, más o menos la quinta parte, lo forman los aros del interior de los talones, que aseguran la transmisión de los esfuerzos a través de la llanta, y que pueden ser de acero o textiles de alto módulo. También de acero, rayón (celulosa regenerada), o polímeros sintéticos, como el poliéster o la poliamida, son la carcasa y las lonas de cima o de refuerzo, que constituyen la estructura del neumático, el esqueleto capaz de soportar la carga y transmitir o absorber los esfuerzos de aceleración, frenado y guiado, para asegurar la unión del vehículo con el firme de la carretera.

Un neumático puede alcanzar más de 200 componentes, que forman parte de las diferentes mezclas presentes en su producción. Se puede reducir la composición de un neumático a sus elementos principales, que varían en función del vehículo al que estén destinados. Así pues, la mayor parte de un neumático es carbono (cerca del 70%) lo que explica su alto poder calorífico (7.500 kcal/kg). Los componentes de la goma sintética en un neumático nuevo de turismo se obtienen a partir de entre 26 y 30 litros de petróleo.

Los principales riesgos ambientales asociados a este residuo vienen dados por dos causas principales:

- La fuente de contaminación ambiental que puede suponer su destrucción o un tratamiento mal realizado, debido a la complejidad del residuo y de su composición química.
- El riesgo de incendio que supone su acopio en malas condiciones. La incineración incontrolada de este residuo provoca gran cantidad de contaminantes peligrosos.

5.2. RECICLAJE DE NEUMÁTICOS

Las cada vez más sofisticadas prestaciones técnicas a que se someten los neumáticos y las diferentes aplicaciones han llevado al diseño de innumerables clases de neumáticos, sin embargo existen unos componentes fundamentales presentes en casi todos ellos:

- *Cauchos*. Caucho natural (que proporciona elasticidad) y los sintéticos: estireno-butadieno, polibutadienos, poliisoprenos, etc., que aportan estabilidad térmica. Durante la fabricación se vulcanizan (introducción de azufre para ligar las cadenas de polímeros).
- *Negro de humo.* Como carga de refuerzo y mejora de la resistencia de los cauchos a la oxidación.
- *Acero y textiles* que refuerzan y soportan las solicitaciones mecánicas.
- *Productos químicos*. Entre los que destacan el OZn como catalizador de la reacción de vulcanización, plastificantes, aditivos, etc.

La Tabla 14.19 muestra unos valores medios de la formulación.

Tabla 14.19. Formulación media de neumáticos

Compuesto	%
Cauchos	47
Negro de humo	22
Acero	16
Textiles	5
OZn	1
Varios (S, ceras, antioxidantes, etc.)	9

Desde el punto de vista del reciclaje el paso más interesante sería hallar un sistema que permitiera la desvulcanización para reusar el material para las misma función.

El neumático es de por sí un residuo complejo. La Figura 14.45 ilustra sobre los diferentes elementos que componen la banda de rodadura. La Tabla 14.20 y la Tabla 14.21 proporcionan unas composiciones medias de los diversos tipos de neumáticos.

Tabla 14.20. Composición de un neumático (elementos)

Material	Automóvil	Camión
Hidrocarburo	48,0	45,0
Negro de humo	22,0	22,0
Acero	15,0	25,0
Textil	5,0	—
Óxido de zinc	1,2	2,1
Azufre	1,0	1,0
Varios	8,0	6,0

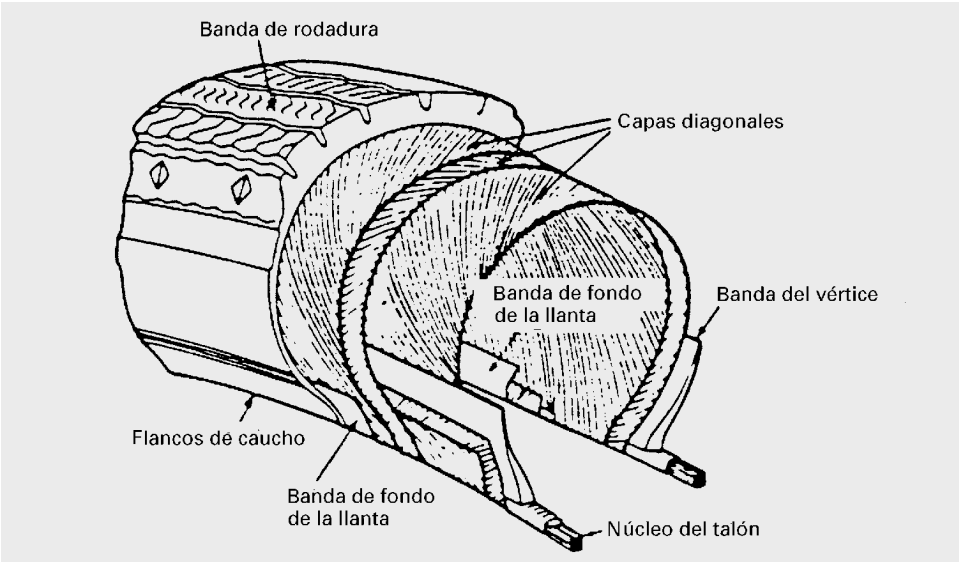


Figura 14.45. Estructura de un neumático.

Tabla 14.21. Composición de un neumático (componentes)

Componente	Automóviles % en peso	Camiones % en peso
Peso (medio) kg.	7-8	16-60
Carbono	70-75	68-72
Hidrógeno	6-7	5-6
Azufre	1-2	1-2
Inertes (rellenos)	3-4	2-3
Hierro	10-12	20-22

Para evitar confusiones se describen sintéticamente las principales definiciones empleadas para el aprovechamiento de los artículos de goma usados:

- *Utilización repetida:* Reutilización de una pieza o algún componente, eventualmente reparado (ejemplo: recauchutado del neumático).
- *Material reciclado:* Reutilización del material, ligeramente modificado, para la misma aplicación o similar (ejemplo: tubos de refrigeración fabricados con parte de residuo).
- *Material recuperado:* Utilización de materiales como modificadores, para la fabricación de artículos distintos. (ejemplo: modificación de asfalto con residuo molido).
- *Reciclado químico:* Transformación en monómeros u otros materiales de bajo peso molecular. (ejemplo: fabricación de gas de síntesis).
- *Reciclado energético:* Valorización energética. (ejemplo: combustible en hornos de cemento).
- *Varios:* Relleno de terraplenes, construcción de diques, taludes, etc.

Existen también numerosas aplicaciones directas de los neumáticos fuera de uso, bien para ser utilizados enteros o semienteros, empleando solamente sus flancos y banda de rodamiento, por ejemplo en defensas de muelles o embarcaciones y en rompeolas; o en estructuras del tipo barrera antirruido, taludes de carretera, estabilización de zonas anegadas, pistas de canteras, retención del agua en aplicaciones agrícolas y control de la erosión principalmente. No obstante todas estas posibles aplicaciones tienen un potencial de empleo muy limitado debido a que no forman parte de los productos y servicios de empresas suministradoras de material de construcción y por tanto su utilización en muchos casos se restringe a proyectos de demostración aislados.

Respecto a la utilización del reciclado, existen múltiples aplicaciones del granulado de caucho obtenido por trituración del neumático, que se emplean en parques infantiles, pistas deportivas, planchas para revestimientos, alfombras de automoción, productos moldeados de bajas especificaciones técnicas, etc., que aunque importantes en cuanto a número, son relativamente minoritarias en cuanto al consumo dada la madurez de algunos mercados actuales.

Sin embargo, se debe mencionar el uso del triturado con granulometrías de 1,5 y 3,0 mm para su empleo como drenaje y amortiguamiento de fuerzas en rellenos de campos de deporte con césped artificial. Esta aplicación consume en España cerca del 50% del material procedente del neumático fuera de uso que se recicla; aunque es posible que este buen desempeño de la demanda actual sea una situación transitoria mientras se alcanza el punto de equilibrio del mercado.

Tabla 14.22. Estimaciones de generación y reciclado de NFU's en España (Fuente NEDES)

Año	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Generación (toneladas)	243.732	265.277	280.300	300.958	285.000	305.718
Material reciclado (toneladas)	3.500	4.000	4.000	23.500	27.143	42.500
% Reciclado	1,43	1,50	1,43	7,81	9,52	13,90

En cuanto a aplicaciones con buen potencial y que aún se deben desarrollar y que permitirán un consumo en grandes cantidades de NFU reciclado será el empleo de granulados de diámetro más bajo para la producción de mezclas asfálticas para carreteras. En general, las mejoras que se consiguen con el polvo de neumático son una mayor resistencia a las deformaciones plásticas (roderas) y la reducción del ruido de rodadura.

En el DVD adjunto, en el punto 5, se muestra información sobre reciclado de neumáticos, granulado y trituración.

Existen dos procedimientos para emplear el polvo de neumático para capa asfáltica:

- La «vía húmeda» que admite a su vez dos variantes y en la cual se modifican previamente el betún que sirve de ligante a la mezcla bituminosa.
- La «vía seca», en la que el polvo de neumático se añade directamente a la mezcla bituminosa como si fuese un filler de aportación.

En ambos procedimientos se han llegado a obtener mezclas asfálticas con buenas características mecánicas y reológicas, con resultados satisfactorios en la mayoría de las pruebas realizadas en tramos experimentales a lo largo de toda la geografía española.

5.2.1. El coste del reciclaje de neumáticos

El año 2006 la entidad sin fines de lucro Signus Ecovalor comenzó sus actividades de reciclaje de neumáticos en todo el territorio español en respuesta al nuevo marco jurídico vigente que establece el principio de responsabilidad del productor de neumáticos como garante de la gestión y valorización de los mismos cuando dejan de ser utilizables para circular. Es así que el consumidor a partir de la entrada en vigor de la nueva legislación ve reflejado en la factura de compra el precio de la gestión medioambiental del neumático.

La tarifa servirá para financiar el proceso completo de reciclaje y valorización desde la perspectiva de un empeño común en defensa del medio ambiente. La entidad Signus tiene previsto emplear en el año 2007 más de 50 millones de Euros en la recogida, transporte, almacenamiento y preparación de NFU para su posterior valorización, además de proyectos de fomento y búsqueda de nuevas soluciones de valorización.

5.3. VALORIZACIÓN DE NEUMÁTICOS USADOS

La posible solución a la acumulación y gestión de los NFU's mediante la valorización energética se convierte en una propuesta interesante por el valor de la energía que se puede obtener. La valorización completa elimina el principal inconveniente de la valorización energética, en instalaciones que no sean cementeras, que es la producción de un residuo sólido más contaminante que el neumático usado de partida.

La valorización completa permite:

- Obtener materias primas para su reutilización en la fabricación de neumáticos.
- Valorizar energéticamente los componentes volátiles del neumático.
- Resolver medioambientalmente el problema existente de la producción y acumulación de NFU.

La empresa Rianarco SL en colaboración con la Universidad de Alcalá de Henares y la Universidad Complutense de Madrid y con el apoyo tecnológico de Eratic-CIS de Valencia (España) ha diseñado una planta para la valorización completa de los NFU que se basa en los siguientes procesos:

1. Pirólisis de los NFU's: obteniéndose básicamente los siguientes componentes comercializables o valorizables:
   - *Gases:* CO, CO_2, CH_4, C_2H_4 e hidrocarburos livianos.
   - *Líquidos:* cetonas, ácido acético, compuestos aromáticos y fracciones no pesadas.

- *Sólido negro:* residuo negro carbonoso (RNC) apto para el empleo como combustible o para la fabricación de «negro de humo».

2. Purificación del RNC: se busca obtener negro de humo de calidad suficiente para ser comercializado.
3. Aprovechamiento energético de la fase líquida: mediante un sistema de cogeneración en ciclo combinado.

En el DVD adjunto, en el punto 6, se muestra más información sobre valoración de neumáticos usados.

Otras posibles aplicaciones de los NFU son:

- Aglomerantes betún/caucho: Existen dos variedades principales. El residuo de neumático triturado muy fino (por debajo de 0,7 mm.) se añade a la fracción bituminosa. El resultado es un firme de carretera de excelente calidad. La otra variante consiste en triturar el residuo y añadirlo como si se tratara de sustituir al árido (llamada vía seca). Repsol-YPF ha desarrollado una tecnología que permite el uso de betún mejorado con polvo de neumáticos reciclados, una vez separado el acero, en la fabricación de asfaltos para pavimentos de carreteras (Dentro de la Operación Asfalto 2006, se han pavimentado diversas calles en Madrid).
- Usos varios: Los más importantes consisten en la fabricación de materiales para la construcción. Así el triturado de neumático aglomerado con polímeros sirve para la fabricación de losetas elásticas para uso en exteriores.
- Otras aplicaciones consisten en el uso de neumáticos para la construcción de arrecifes artificiales, bloques antivibratorios, taludes, elementos de protección, etc.
- Otro empleo es la mezcla con poliuretano para la fabricación de pavimentos de alta absorción.

En el DVD adjunto, en el punto 7, se aporta información sobre el reciclado de neumáticos como material de construcción.

5.3.1. Valorización del granulado de neumáticos usados

Los residuos de caucho provienen principalmente de los NFU, que actualmente en Cataluña se estima en 35.000 t/año; también provienen de los polvos de caucho que genera la industria y de bandas de cintas transportadoras fuera de uso entre otros. El Centro Catalán del Reciclaje de la Agencia de Residuos de Cataluña propone las siguientes alternativas para la utilización de granulado de caucho proveniente de NFU:

- Losetas para zonas de alta montaña: más ligeras, con buena resistencia al impacto y a las resquebrajaduras causadas por los ciclos de hielo y deshielo.
- Bloques de construcción con propiedades aislantes acústicos.
- Losetas para revestimientos exteriores: más ligeras, aislantes acústicos y con apariencia atractiva.

En todos estos productos prefabricados con hormigón, parte del árido convencional ha sido reemplazado por granulado de caucho proveniente de los NFU. El porcentaje de granulado de caucho a utilizar dependerá del producto prefabricado, siendo razonable un contenido mínimo del 3% del peso de la pieza.

5.3.2. Trituración y molienda de los NFU's

Para cualquiera de las valorizaciones a que se pueden someter los neumáticos es preciso una trituración, para ser más conciso una trituración previa de unos 10-20 cm, antes de iniciar la trituración definitiva. Ésta se lleva a cabo en un triturador de cuchillas de tres ejes que gira a baja velocidad para favorecer la incorporación del propio neumático.

Existen dos sistemas de producir el granulado:

- *Trituración criogénica.* El neumático es un cuerpo elástico, pero si se somete a baja temperatura, operación que se efectúa con nitrógeno líquido y se logra una temperatura de trabajo por debajo de los –60 °C, se torna quebradizo y se desintegra fácilmente en molinos de martillos convencionales. El inconveniente que tiene es el gran consumo de nitrógeno. La Figura 14.46 muestra el sistema que pone en contacto el líquido refrigerante con el neumático previamente troceado.
- *Trituración convencional.* Se trata de molinos clásicos, como el que esquematiza la Figura 14.47. El acero se separa por medio de separadores magnéticos y el textil por mesa densimétrica.

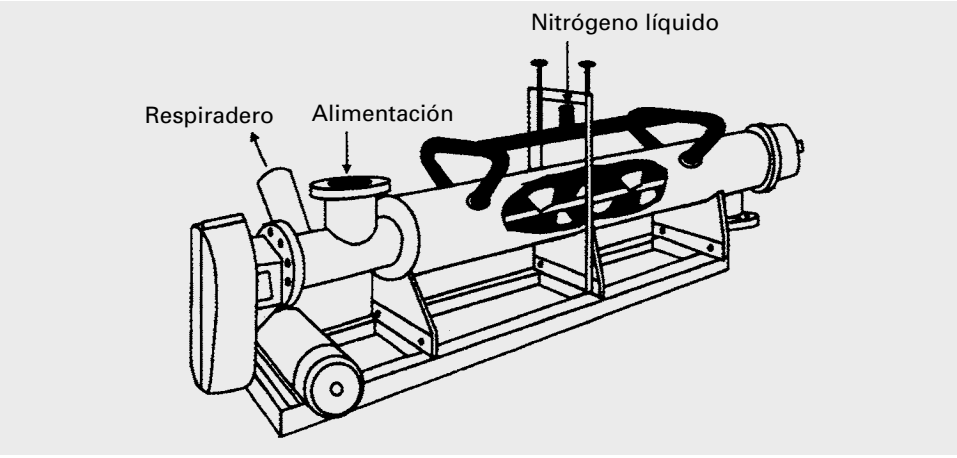


Figura 14.46. Sistema de trituración criogénica.

- *Trituración avanzada.* Se trata de un método, en periodo de pruebas, que consiste en generar impulsos eléctricos que provocan potentes descargas eléctricas a través de la cuerda metálica interna lo que favorece la separación de componentes gracias al choque magnético.

5.3.3. Valorización de NFU's para carreteras

Las tres formas clásicas de valorización de NFU's para su uso en firmes de carreteras son:

- *Modificación de betunes:* solución también denominada vía húmeda, ya sea para el propio firme de carreteras o para membranas impermeabilizantes. Consiste en incorporar al betún una cierta cantidad de neumático triturado, bajo ciertas condiciones de mezclado: temperatura, sistema y tiempo de mezclado.

  Con ello se logra una estructura de la base asfáltica más noble y realza ciertas propiedades técnicas como la elasticidad que redunda en mejores prestaciones de los firmes, principalmente la adherencia, la vida y calidad del firme.

  Con las membranas impermeabilizantes se persigue la fabricación de juntas de dilatación y productos para el puenteado de fisuras.
- *Sustitución de áridos pétreos:* Se trata de la adición de triturados de neumáticos para la sustitución de los agregados pétreos de las masas bituminosas. Estas mezclas asfálticas son empleadas para capas de base o intermedias, capas de rodadura de granulometría densa (continua o discontinua) o mezclas porosas. Es la llamada vía seca. De hecho existen dos variantes de la denominada vía seca. En la llamada vía seca sin digestión, la adición de polvo de neumático dismi-

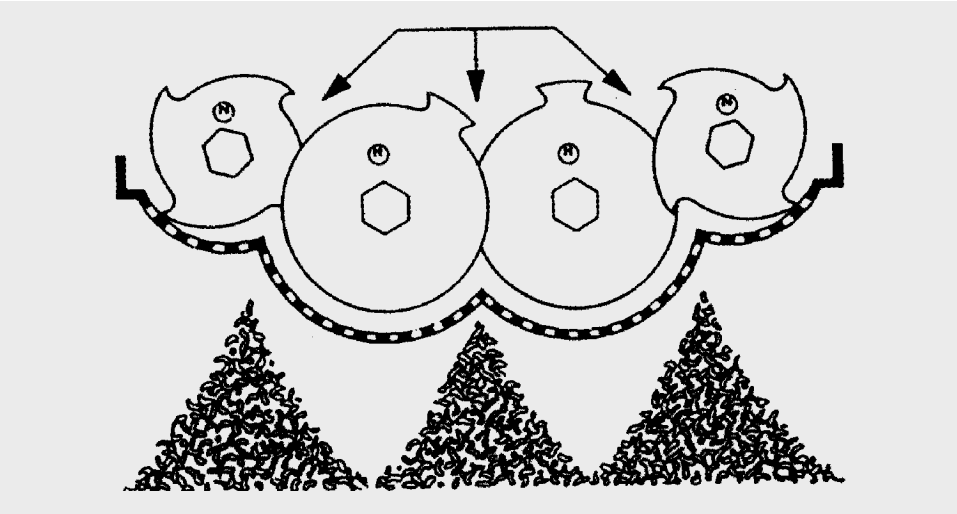


Figura 14.47. Sistema de trituración convencional.

nuye la compacidad de las mezclas con él fabricadas. Parece como si aumentara el espesor de la película de ligante que envuelve a los áridos, incrementando su separación y disminuyendo la compacidad de la mezcla. En la variante de vía seca con digestión, la mezcla fabricada permanece a 165 °C durante 1 o 2 horas, lo que tiene un efecto determinante y positivo sobre el poder aglomerante del ligante. En la vía húmeda, el polvo modifica la reología de la pasta y logra un mejor poder aglomerante que los betunes de base.

Hay que añadir que la vía seca no mejora de por sí las prestaciones técnicas del firme. De hecho se sustituye, aunque sea parcialmente, un árido muy barato por un polímero de alto coste de preparación, lo que suele encarecer el sistema en un 15% respecto a la solución tradicional.

5.3.4. El confort acústico y tráfico urbano

Tanto el ruido interno, que solo percibe el conductor, como el ruido externo que es el responsable del impacto ambiental del tráfico, tienen su origen en la interacción del neumático y la superficie de rodadura. Se pueden distinguir tres grandes causas:

- Irregularidades en la superficie de la carretera, ya sea en forma de deterioros o discontinuidades del asfalto, o bien macrorrugosidades de la superficie. Es en este campo donde tiene aplicación el firme de bajo ruido.
- Discontinuidades en la superficie del propio neumático.
- Discontinuidades internas del neumático.

5.3.5. Usos del granulado de NFU's

Al margen de las citadas anteriormente o bien las valorizaciones energética, los usos más habituales son:

- En los propios automóviles formando parte de esterillas, volantes, carcasas de baterías, paneles, etc.
- En el ferrocarril, en las vías de trenes y tranvías para absorber el ruido y las vibraciones.
- En superficies deportivas al aire libre y en interiores para crear superficies que amortigüen el impacto de los golpes.
- En forma de baldosas aglomeradas con polímeros. Con ello se logran suelos antideslizantes, resistentes al agua, antibacterias y antimoho.
- Materiales para tejados. Ya sea en forma de tejas o láminas impermeabilizantes y resistentes a la radiación ultravioleta.
- Moquetas para interiores que atenúan el impacto sonoro y mejoran el aislamiento térmico.
- En piezas de calzado.
- Objetos para mobiliario urbano e interiores. Sistemas de señalización. Circuitos de velocidad.
- En ingeniería: Construcción de taludes de alta seguridad. Láminas de impermeabilización. Suelos drenantes.
- Pavimentos muy flexibles.
- Arrecifes artificiales y barreras para embarcaderos.

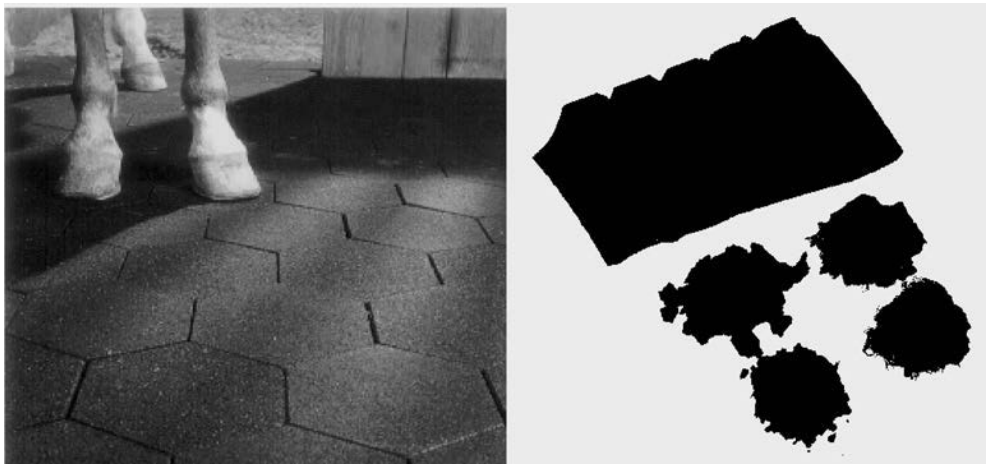


Figura 14.48. Materiales y usos de los granulados de NFU's.

6. La problemática de los diversos tipos de aceites minerales residuales

Dentro de los residuos del automóvil, el aceite es, sin duda el de mayor impacto potencial. Primero porque se cambia muchas veces a lo largo de la vida y, en segundo lugar por su peligrosidad intrínseca, su naturaleza líquida y su gran impacto potencial.

En España se generan unas 250.000 t/año. Los estudios indican que se podría llegar a recoger un 60% de los aceites vendidos en el sector de automoción y un 50% de los industriales. Las tasas de recogida van del 85% en Alemania o Reino Unido a valores muy bajos en Grecia o Portugal. La Figura 14.49 muestra, en porcentaje de peso sobre el total, la gestión del aceite usado en la UE.

Hay que distinguir entre la cantidad recogida, la mencionada en el párrafo anterior, y la tasa de recuperación que, difícilmente, llega al 50%. Esto es, una parte importante del aceite queda en los filtros, otra se evapora o, simplemente, se pierde por derrame.

Obstáculos a la regeneración: El proceso significa separar los contaminantes, especialmente los PCB's, los productos de oxidación, aditivos y otros contaminantes para convertirlo en un nuevo aceite base. Los obstáculos principales son:

- Hace falta una logística de recogida muy buena y una infraestructura adecuada para gestionar residuos peligrosos.
- Tiene un PCI muy elevado, lo que es una tentación para la utilización como combustible ilegal.

La valorización energética: Debe distinguirse entre:

- La destinada a la generación de electricidad, normalmente en motores de cogeneración. En este caso los aceites deben someterse a un tratamiento fisicoquímico para eliminar agua, metales pesados, fangos y otros contaminantes.
- La destinada a usos de combustible alternativo para funciones de calentamiento. En este caso los requerimientos de descontaminación son menores. Por lo general el pretratamiento se limita a eliminar fangos, agua y a homogeneizar los diversos aceites.

La caracterización de un aceite medio usado de automoción contiene, solo de material inorgánico, los siguientes contaminantes:

- Sulfuros: 0,34% en peso.
- Cenizas: 1,80% en peso.
- Plomo: 1,10 % en peso.
- Calcio: 0,17% en peso.
- Zinc: 0,08% en peso.
- Fósforo: 0,09% en peso.
- Bario: 570 ppm.
- Hierro: 360 ppm.
- Vanadio: 5 ppm.

Por término medio tiene un 5% de agua y una viscosidad a 25 °C de 53 Centistokes.

En una planta de regeneración de aceites usados el proceso de tratamiento puede dividirse en 2 etapas:

- Etapa 1: Proceso de estabilización para la alimentación del residuo a la planta:
  - Cribado-Filtrado: eliminación de lodos.

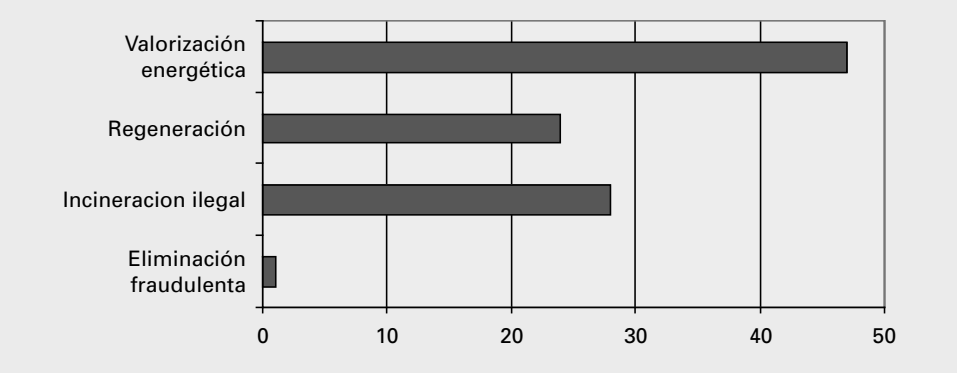


Figura 14. 49. Gestión del aceite usado en la UE.

  - Destilación a baja temperatura: eliminación de impurezas:
    - Impurezas condensables (aguas contaminadas) a gestión final.
    - Impurezas no condensables (volátiles) a antorcha.
  - Corriente de salida: aceite de carga estabilizado, sirve para la alimentación de la etapa 2.
- Etapa 2: Proceso de destilación del aceite usado estabilizado:
  - Alimentación: aceite de carga estabilizado.
  - Destilación del aceite a mayor temperatura.
  - Corrientes de salida:
    - Destilado ligero símil de gasóleo.
    - Bases lubricantes regeneradas.
    - Fondo de destilación (combustible tipo fuel).

6.1. REGENERACIÓN POR DESTILACIÓN

El aceite es recogido y transportado a la planta de tratamiento donde se analiza cada partida (Aquí son rechazadas las partidas que contengan más de 50 ppm de PCB's) y se vierte en un tanque de almacenamiento.

En el proceso el aceite se somete a sucesivas destilaciones a presión. A cada nivel de temperatura se extrae una determinada fracción de los componentes que se recuperan por separado. La primera destilación, a 200 °C, separa agua e hidrocarburos ligeros, utilizados en la misma planta como combustibles. En la segunda destilación, a 280 °C, se obtienen gasoil y aceites ligeros que se destinan a combustibles convencionales.

Los aceites resultantes de las dos últimas etapas de destilación están limpios, sin metales pesados ni partículas pero tienen que mejorar sus características (color, viscosidad,...).

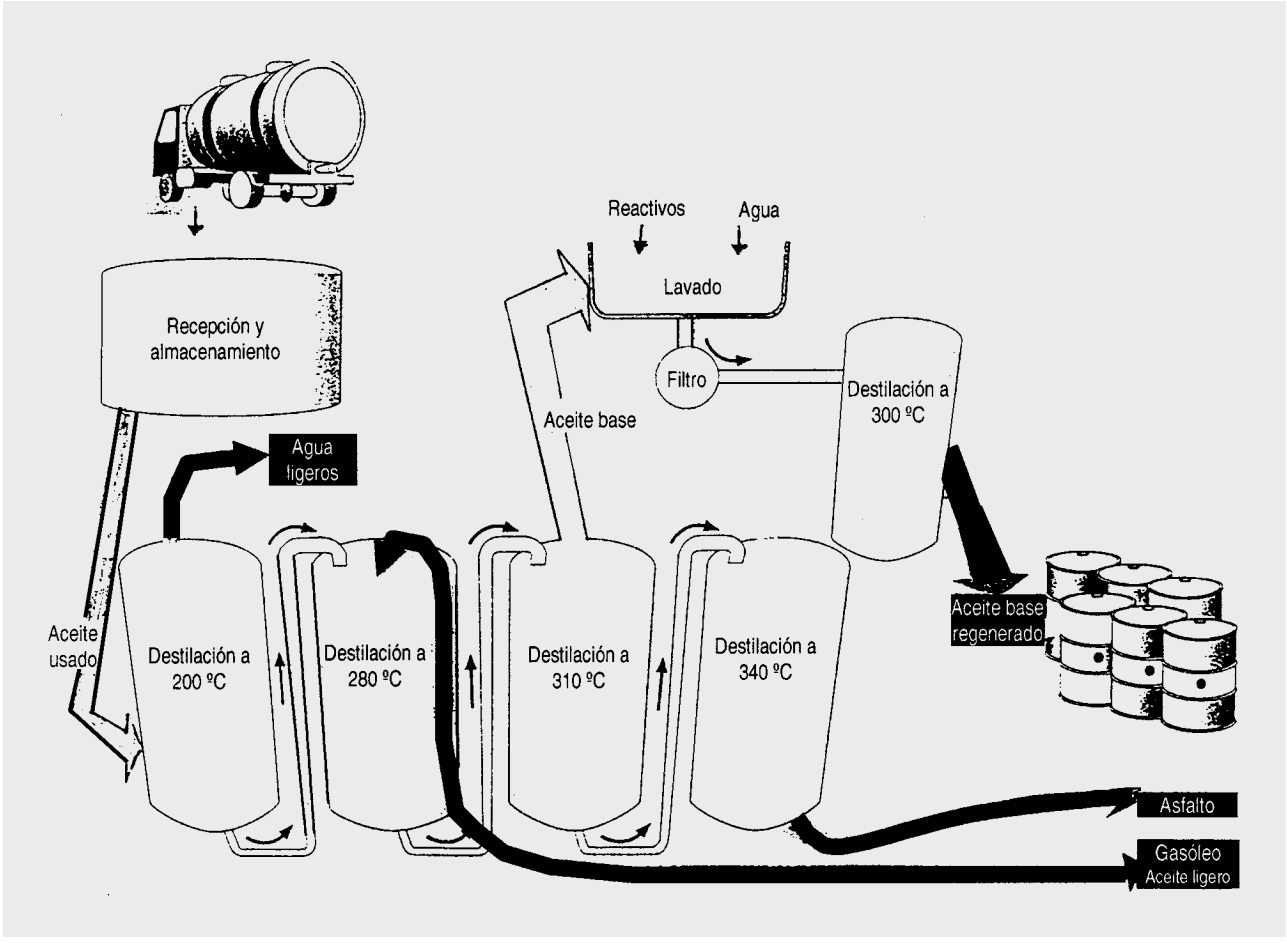


Figura 14.50. Regeneración de aceite de automoción.

El refinado consiste en una reacción alrededor de los 300 °C que facilita la separación de productos oxidados, un lavado con agua y una separación en un filtro electroestático.

Como resultado se obtiene un aceite que, después de una nueva destilación, ya es aceite refinado comercializable y una solución salina útil como fertilizante o como agua de proceso. En las siguientes destilaciones aparece el aceite base, aproximadamente un 60% del entrante, ya exento de metales. Con reactivos se lava, se filtra y se obtiene un aceite base para su reutilización.

6.2. REGENERACIÓN TOTAL

Como en el caso anterior, los aceites llegan a planta donde solo son rechazados los que contienen mas de 50 ppm de PCB's. Los demás se homogenizan en tanques de recepción.

El proceso se inicia con un pretratamiento químico donde se añaden productos químicos y catalizadores para favorecer la separación de componentes. Con un «striping» de propano se extrae la fase de asfalto, separándola de los aceites y aditivos, sin que se produzca la descomposición térmica, evitando el craqueo y la emisión de malos olores. Después de enfriar, se recupera el propano que se reintroduce en el ciclo.

A partir de este momento se inicia una serie de destilaciones para ir separando los diversos componentes. La Figura 14.51 muestra el principio de funcionamiento del proceso.

Los principales productos obtenidos son:

- 75% de base lubricante regenerada. Apta para la venta.
- 18% de compuestos asfálticos, que se comercializan como impermeabilizantes.
- 2% de hidrocarburos ligeros que se usan en la propia planta.

6.3. LA VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE LOS ACEITES

La utilización de aceites usados para este fin requiere, tanto por razones técnicas como ambientales un pretratamiento previo a su empleo. En la destinada a la generación de electricidad, normalmente en motores de cogeneración, los aceites deben someterse a un tratamiento fisicoquímico para eliminar agua, metales pesados, fangos y otros contaminantes.

La Figura 14.52 muestra un motor de cogeneración. Hay que tener en cuenta que los motores que siguen ciclos diesel tienen un rendimiento de conversión eléctrica mejor que los de ciclo Otto (gas o gasolina). En motores de cierto tamaño, mas de 1 mw(e), el rendimiento se acerca al 45%.

En la opción destinada a uso de combustible alternativo los requerimientos de descontaminación son menores. Por lo general el pretratamiento se li-

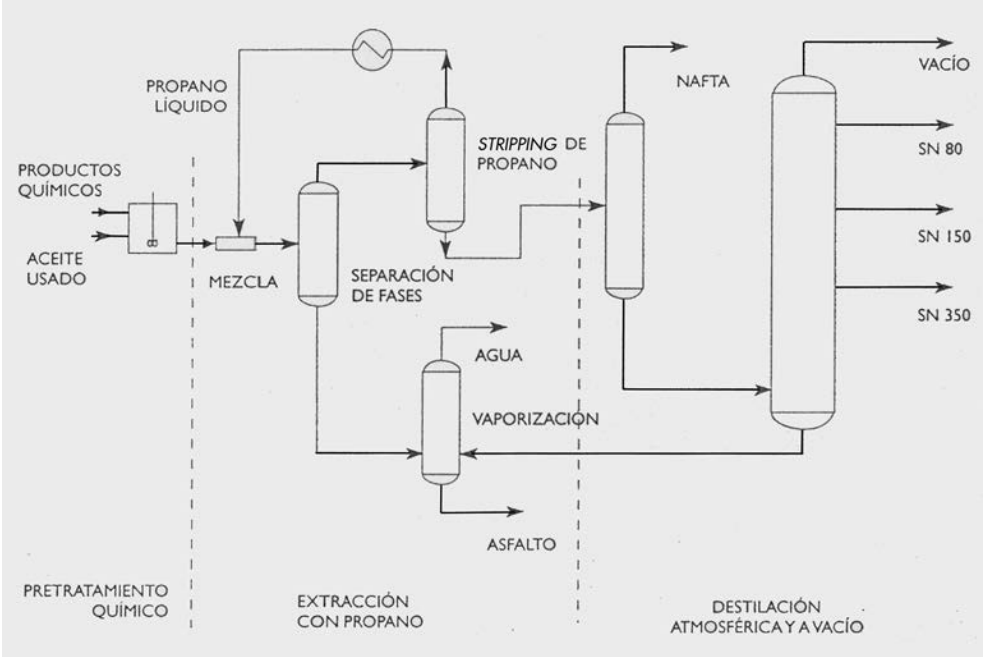


Figura 14.51. Regeneración de aceites de automóviles.

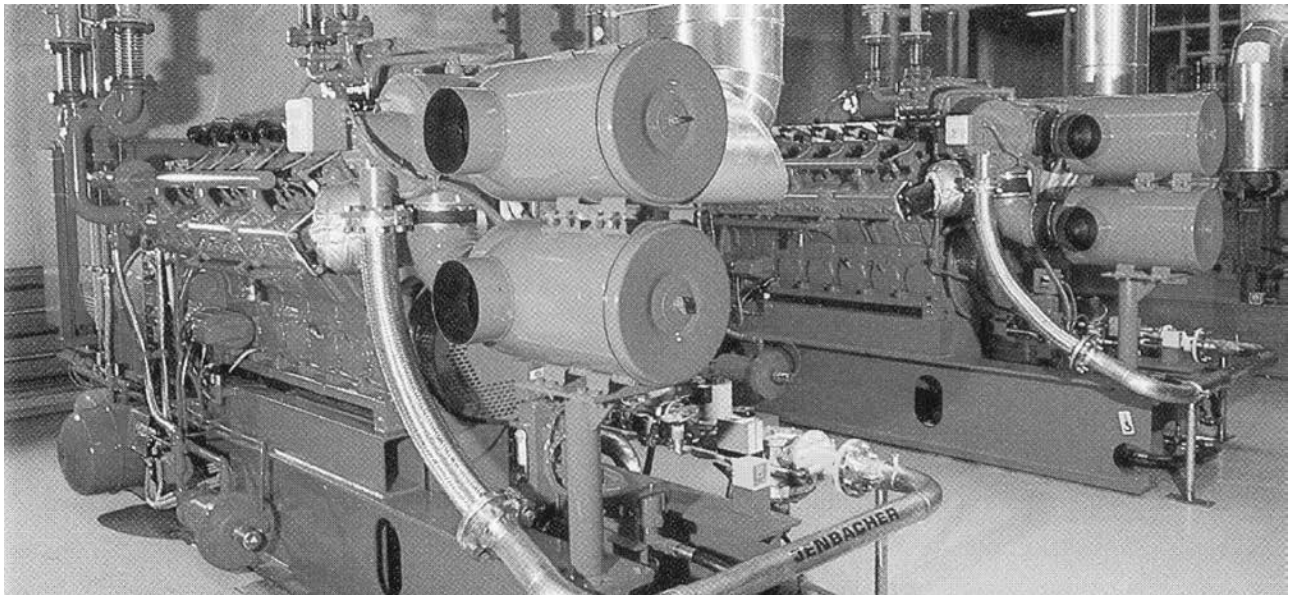


Figura 14.52. Motor de cogeneración.

mita a eliminar lodos, agua y a homogeneizar los diversos aceites. Por lo general se deberían destinar a combustible aquellos aceites de baja calidad. O sea aquellos que:

- Contienen más del 6% de agua.
- Mas de 2.000 ppm de cloro, o más de 50 ppm de PCB's.

Obviamente cuanto tan alta es la cantidad de elementos clorados es preciso una incineración en plantas destinadas a ello. Donde la temperatura de la cámara de postcombustión supera los 1.200 °C.

6.4. RESUMEN DE LA GESTIÓN EN ESPAÑA

En España se consumen cerca de 500.000 t/año de aceites lubricantes nuevos, de los cuales algo más del 50% se convierte en residuo de «aceite usado». A finales del 2001 el resumen de la gestión de los aceites usados en España, aparecen en la Tabla 14.23.

Tabla 14.23. Gestión de aceites usados en España

Tipo de valorización	T/año	%
Regeneración	31.238	16
Otros reciclados (fabricación asfalto)	3.905	2
Cogeneración	37.095	19
Uso como combustible térmico	123.000	63
Total	**195.238**	**100**

De la contemplación de la tabla se deduce que no se cumple escrupulosamente la prioridad de gestión: el reciclado (regeneración y otras formas) debería ser prioritaria, frente a la valorización energética. No obstante, donde debe ponerse más énfasis es la captación de la cantidad de aceite que llega a las plantas de tratamiento. Las cifras indican que no alcanza el 50% del total de aceite puesto en el mercado.

6.5. RESEÑA SOBRE EL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS ACEITES

La mejor manera de dilucidar cual es la opción más ecológica a llevar a cabo sobre la gestión de los aceites usados consiste en realizar un análisis del ciclo de vida.

La Agencia Federal del Medio Ambiente de Alemania llevó a cabo un ACV sobre las siguientes sistemas de tratamiento:

- Regeneración (materia prima para lubricantes).
- Incineración en cementeras.
- Procesamiento de aceites para calefacción.
- Gasificación a presión para sintetizar metanol.

El ACV (llevado a cabo según estándares internacionales ISO 14.040 y 14.042) concluye en que ninguno de los métodos demuestra una clara ventaja sobre los otros desde el punto de vista ambiental.

6.6. REPROCESAMIENTO PARA OTROS FINES

Se puede procede a un tratamiento alternativo, como el que indica la Figura 14.53. En el decantador se separan las partículas más grandes. En la fase de calentamiento y filtración al vacío se retiran los compuestos ligeros. Después de una neutralización se procede a una nueva destilación y centrifugación. De aquí se recupera el 90% del material entrante. Los fangos pueden valorizarse mezclándolos con los asfaltos.

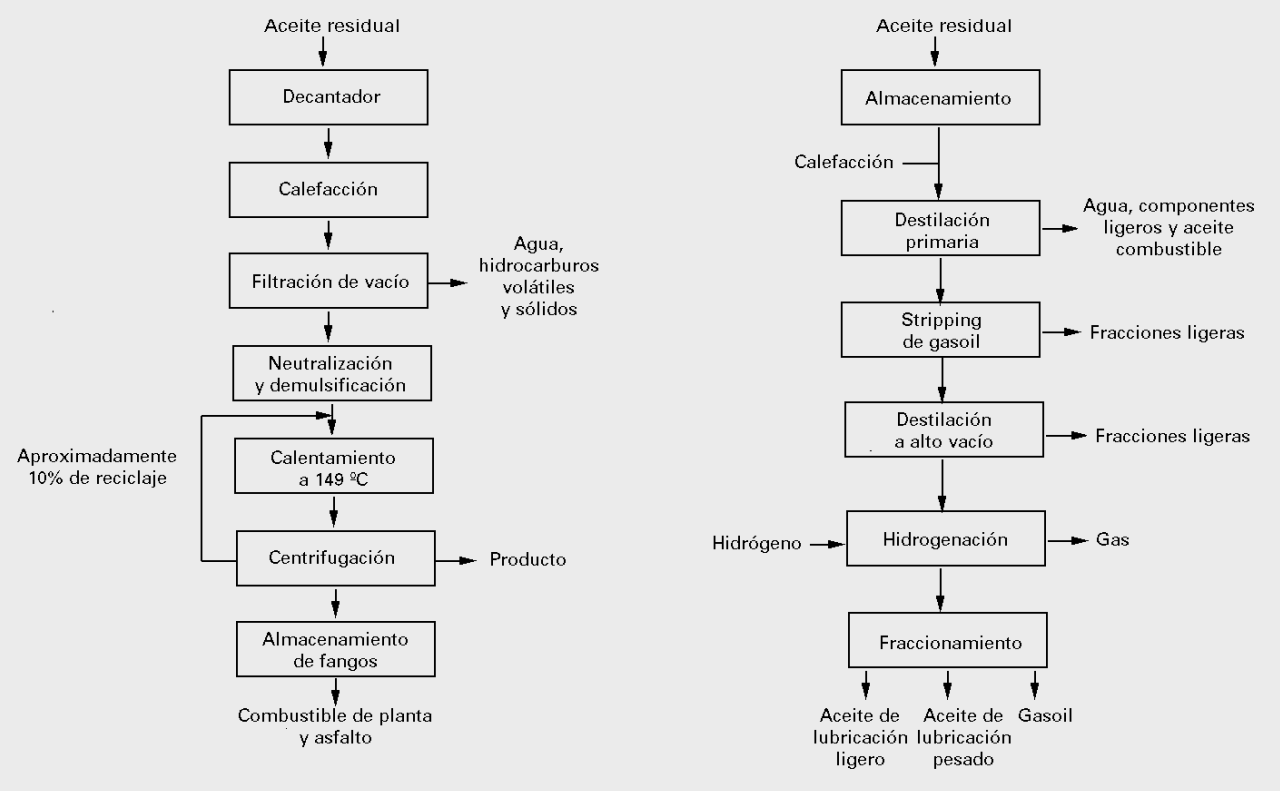


Figura 14.53. Valorización del aceite de automoción.

7. Reciclaje de residuos de la construcción y de la deconstrucción

Este apartado, después de una introducción y justificación histórica, se dedica a analizar las posibilidades de valorización de los residuos de la construcción, dejando al margen la problemática de las grandes obras públicas que ya se analizó en el Capítulo 8.

7.1. EL RECICLAJE EN LA CONSTRUCCIÓN

La construcción, por lo que se refiere a los materiales mayoritarios que la constituyen, es una industria que ha evolucionado relativamente poco. Hoy en día se cuenta con los mismos materiales que durante el periodo modernista (arquitectura típica catalana del final del siglo XIX y albores del XX): los clásicos más el acero y el cemento Pórtland.

Los edificios actuales aún son básicamente de piedra, en un porcentaje (del orden de un 53%) superior a los del principio del siglo XX, en los que predominaba la arcilla cocida. La diferencia más llamativa entre la construcción actual y la antigua (la romana por ejemplo) es que en la construcción actual la piedra se usa con una finura de molido superior, sea como árido para la fabricación de pastas, sea como crudo para la fabricación de cemento. Cabe anotar que en la reducción del tamaño del grano se consume una gran cantidad de energía.

Otra diferencia a remarcar estriba en que la construcción antigua tenía como objetivo prioritario el aprovechamiento a fondo de todo aquello que le era útil para la construcción de la obra gruesa. Tanto si

procedía de los excedentes de una industria (paja, bosta,...) como si procedía de la propia construcción (escombros), todo ello era fagocitado para saciar la gran demanda de materiales que produce este sector.

Hoy el sector es fundamentalmente consumista y su gran demanda de materias primas (muy superior a cualquier otra industria) causa un considerable y reconocido impacto en el medio natural.

Las ruinas de la civilización romana han sido la gran cantera y el suministrador de materia prima de casi todas las épocas, especialmente de las construcciones árabes españolas y de gran parte de los monumentos carolingios y románicos. Así mismo, fueron muchos los papas que se dedicaron a expoliar el Foro Romano para obtener columnas para las construcciones vaticanas.

Si el mundo romano llegó a construir un territorio parecido al que se ocupa en la actualidad, alguien se preguntará ¿y aquellas construcciones, dónde están?. Simplemente han sido reutilizadas hasta su práctica extinción (ver Figura 14.54) y de ellas sólo quedan algunos cimientos cuyos restos se descubren a medida que el arado o el bulldozer hacen aflorar los restos de los conjuntos monumentales «redescubiertos» recientemente.

Este talante del sector de la construcción (reutilizador hasta la exhaustividad) se ha perdido hace muy poco. En los años 1950 aún existía en las obras la figura del «escafilador» (el que eliminaba los restos de mortero de los ladrillos recuperados de una obra anterior), actividad desarrollada, a ratos, por un peón joven o por el guarda de la obra. Es importante darse cuenta de que en la construcción, si un trabajo tiene un nombre específico es que ha alcanzado la categoría de «partida de obra» y por ello tiene asociados unos rendimientos y unos costes. Este aspecto es fundamental para que el material o la actividad sean considerados como un elemento potencialmente constitutivo de una obra. Desgraciadamente, hoy no podemos decir lo mismo de las operaciones necesarias para conseguir y aplicar materiales reciclados.

Es probable que en la construcción del ensanche de Barcelona los ladrillos recuperados de construcciones anteriores no se llegaran a usar en la construcción de las comprometidas paredes de media asta (las más delgadas de aquel tiempo, en todo el mundo, en las construcciones de aquella altura) pero cabe pensar que junto con los restos de muralla o los restos de muros antiguos de piedra procedentes de los grandes derribos de los siglos XVIII y XIX (del barrio de Ribera, el de la Ciudadela y el de las Murallas), fueron un material que los coetáneos consideraron como muy apreciado para la construcción de cimientos o de paredes gruesas, tal como se puede observar en múltiples edificios de la época.

Se podría lamentar de que se hayan perdido aquellas prácticas, pero el mundo (y la construcción con él) ha evolucionado y no es posible mirar hacia atrás sin aplicar una revisión crítica a esta mirada. Es necesario convenir que los objetivos de la construcción de todas las épocas han sido fundamentalmente económicos. Si actualmente se aplican los mismos principios de economía seguramente se colegirá que se llega a la misma conclusión. En un mundo esen-

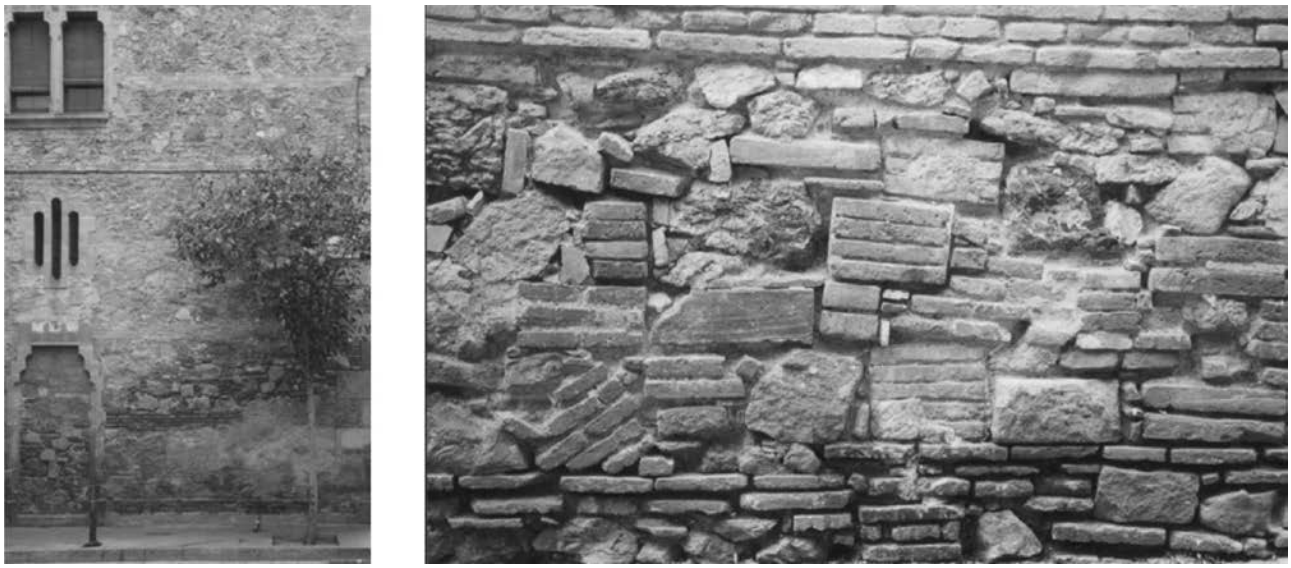


Figura 14.54. Ejemplo de reutilización. Fuente: ITeC.

cialmente liberal, costará mucho trabajo llegar a sustituir una realidad (la economía) por una «entelequia» (la protección del medio natural) sino se justifica a través de claras ventajas de orden económico o se impone, por vía coercitiva, estableciendo un cuerpo legal adecuado.

Es obvio que desde las construcciones citadas de los albores del siglo XX hasta hoy se ha producido un cambio fundamental: en aquellos días el mayor costo de la construcción recaía en los materiales y hoy lo hace en la mano de obra. Debe ser el sector quien decida si este es el momento económico adecuado para aplicar las ventajas (que se consideran múltiples) que se derivan de la utilización de productos procedentes del reciclado de los sobrantes de la construcción.

En la construcción de la arquitectura se puede usar prácticamente cualquier material, sean cuales sean sus propiedades. Siempre que esté debidamente caracterizado de acuerdo con su uso; que las propiedades que lo definen sean suficientemente constantes para poder desarrollar una tecnología de aplicación, y que sean conocidas y aceptadas por el prescriptor que tiene que ordenar su uso.

Son materiales de construcción tanto los que participan en misiones tan poco selectivas como los rellenos, como los que se usan en la fabricación de hormigones de alta resistencia o de hormigones autocompactables (por cierto, en estos hormigones tan especiales se suelen utilizar cenizas volantes y humo de sílice que proceden de residuos industriales).

Hay que albergar la esperanza de que, en un futuro, todos los materiales que se usen en la construcción lleguen a satisfacer uno de los principios fundamentales de la sostenibilidad: poseer un ciclo de vida cerrado, es decir, que la materia prima básica proceda de los residuos de la propia construcción y la demanda de nueva materia prima se justifique únicamente a partir del crecimiento vegetativo.

Singularmente, de este punto de vista hoy sólo participan aquellos productos en los que su recuperación implica claras ventajas económicas (chatarras) o bien aquellos otros que, por otros motivos la sociedad empieza a estar preocupada por la protección al medio natural y que les ha llevado a ajustar sus métodos para no perder cuota de mercado (PVC, aluminio, etc.). Sin embargo, la mayor parte de los residuos pétreos (el 75% de los derribos) se pierden en los vertederos al hilo de las ventajas de todo orden que presenta la demolición masiva y sucia de edificios, basada en la gran potencia de la maquinaria al uso.

Hasta este momento los únicos usuarios masivos de materiales procedentes del reciclado de residuos lo han sido por motivos económicos. Países sin territorio montañoso que les permitiera obtener áridos de calidad como Países Bajos, Bélgica o el norte de Alemania han encontrado en los reciclados una salida que les permitiera cubrir sus necesidades, hasta el punto de llegar a excavar sus vertederos para satisfacer la demanda.

La segunda guerra mundial generó una inmensa cantidad de residuos en las ciudades del norte de Europa, a la vez que, en su destrucción, se ponía en marcha la necesidad de reconstruirlas en un futuro inmediato. Desgraciadamente aquellas zonas tan afectadas por los bombardeos masivos han sido, desde siempre, deficitarias en áridos naturales y no es de extrañar que fuera precisamente allí donde se dieron los primeros pasos en la reutilización de los residuos de construcción.

En los años 1970 era frecuente contemplar desde la Euromast de Rotterdamm como una hilera de gabarras cargadas de residuos se dirigía a mar abierto para deshacerse de ellos. Hoy en el mismo país, se están excavando antiguos vertederos para conseguir tanta materia prima como se pueda para suministrar los áridos necesarios para la construcción.

Este hecho, de fuerte repercusión ambiental corre parejo a otro: la crisis del petróleo de los años 1970, que sensibilizó a los políticos del área económica en el sentido de que se intuía que la energía seria un problema grave a corto plazo. La demanda de petróleo tendía a subir exponencialmente (y aún no se contaba con el desarrollo chino), mientras que las reservas de este tipo de energía eran limitadas (aún no se hablaba de no renovables).

La experiencia de estos países ha influido sobre el resto de la comunidad en un momento en que el mundo empieza a ser sensible a la destrucción del medio natural, tanto a través de las múltiples explotaciones de materias primas no renovables como inutilizando gran parte del territorio para destinarlo a extensos vertederos.

Corría el año 1990, cuando Barcelona ya había sido declarada sede de los juegos olímpicos, en el que coincidieron una serie de circunstancias favorables para la implantación de los reciclados en la construcción. Por un lado, ya se contaba con una cierta experiencia a nivel internacional sobre el buen comportamiento de los áridos procedentes del reciclado de derribos y a nivel prenormativo ya existían numerosos documentos a los que consultar, por otro lado, la extensión de los derri-

bos que se generaron durante la demolición de las construcciones existentes en la zona de la Villa Olímpica era tan grande, que se decidió instalar una central recicladora a pié de obra. Con el reciclado de estos residuos se construyeron todos los viales de la Villa Olímpica y buena parte del Cinturón del Litoral, que han tenido un magnifico comportamiento hasta la actualidad (ver foto en la Figura 14.55).

Se puede afirmar que en el año 1992 se tenía el compendio legislativo y el conocimiento práctico necesarios para poner en marcha, sin dilaciones, un nuevo mercado basado en los reciclados de construcción. No se produjo el necesario empujón político para que fuera así. Sea por la precariedad económica a la que siempre se hace referencia, sea porqué las voluntades políticas se centraron únicamente en el establecimiento de una red suficiente de vertederos, la verdad es que hasta hace muy poco no se ha vuelto a pensar en la necesidad de reducir la cantidad de residuos que genera la construcción en base a su tratamiento y reutilización.

La política ambiental favoreció una amplia red de vertederos (depósitos, como eufemísticamente se les denomina) y se relegaron al olvido aquellas interesantes experiencias de reciclaje adquiridas durante los Juegos Olímpicos. Mientras, eran varios los países de la UE que estaban avanzando en sentido contrario: cerrando vertederos y potenciando la minimización de los residuos del sector.

Este desfase puede ser seguido a través del análisis comparado de las legislaciones europea, nacional, autonómica y los proyectos de investigación realizados en el ITeC, desde 1990.

La Tabla 14.24, sin pretensión de entrar en el detalle, procura reflejar algunos de los documentos representativos que de algún modo han influido en la evolución del reciclaje de los residuos de construcción y demolición, los RCD.

7.2. HISTORIA DEL TRATAMIENTO DE LOS RDC

La preocupación de la UE por establecer las bases que permitan el desarrollo de un cuerpo legislativo concerniente a los residuos se plasma en la Directiva 75/442/CEE del Consejo, de 15 de julio de 1975, relativa a los residuos. En ella se da la potestad a cada estado miembro de determinar los organismos necesarios para encontrar los mecanismos de autorización y vigilancia de las empresas que se ocupan del tratamiento, almacenamiento, depósito o recogida de los residuos. Y se consolida, entre otros aspectos clave, el principio de jerarquía por el que se relegan a último término, aquellas opciones de gestión que tienen un impacto ambiental mayor.

Figura 14.55. Cinturón del Litoral. Barcelona. Fuente: ITeC.

Tabla 14.24. Evolución del reciclaje de residuos de construcción

Año	UE			Cataluña			España		
	Legislación general residuos	**Políticas, estrategias y planes sobre residuos**	**Normalización árido reciclado**	**Legislación general residuos**	**Políticas, estrategias y planes sobre residuos**	**Normalización árido reciclado**	**Legislación general residuos**	**Políticas, estrategias y planes sobre residuos**	**Normalización árido reciclado**
1975	Directiva 75/442/CE (residuos)								
1989		SEC (89) 934 Estrategia comunitaria							
1990		OJ C122/2 Resolución sobre política de residuos							
1991		Programa de flujos prioritarios							
1993		V Programa Marco Medio Ambiente 1993-2000		Ley 6/1993					
1994				Decreto 201/1994 Regulador de RCD					
1995					PROGROC 1995-2000 Programa de Gestión de RCD	Propuesta de norma sobre granulados			
1997				Decreto 1/1997 (vertederos)					
1998			Mandate to CEN/CENELEC M125				Ley 10/1998		
1999	Directiva 1999/31/CE (vertederos)								
2001					PROGROC 2001-2006		RD 1481/2001... (vertederos)	PNRCD 2001-2006 Plan Nacional de RCD	
2002		VI Programa Marco Medio Ambiente 2001-2010	EN-13055.1 EN-13139 EN-13383 EN-13242 EN-12620 EN-13043 EN-13450						
2003		COM (2003) 301 Estrategia Comunitaria		Ley 16/2003 ... canon deposición de residuos					
2006							Borrador de Real Decreto .../... regulador de RCD		Borrador del Anejo EHE

	Proyecto de investigación y coordinador	**Países o regiones implicadas**
1990 1993	REWARD PL 900 024: Dévelopement du recyclage des matériaux de démolition CSTC-Centre Scientifique et Technique de la Construction	Bélgica, España y Francia
1995 1997	LIFE95: Formación de técnicos en medo ambiente-edificación COAC-Colegio de Arquitectos de Cataluña	España
1998 2000	LIFE98 /ENV/E/000135: Minimización y gestión de residuos de la construcción ITeC-Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña	España
2003 2006	LIFE03 ENV/E/000150: Reduciendo el impacto ambiental de la construcción-RECONS Gremio de Constructores de Obras de Barcelona y Comarcas	España

En primer lugar se deberán fomentar acciones dirigidas a la prevención de la generación de residuos, y después (respetando el orden), favorecer la reutilización, el reciclaje y la utilización del residuo como fuente energética. Por último, si no ha sido posible cualquiera de las alternativas anteriores, destinar el residuo hacia la disposición final en vertedero.

La transposición de la mencionada directiva a nivel estatal acaece en el año 1998, con la Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos, mientras que en el ámbito autonómico Cataluña se avanza 5 años con la Ley 6/1993, de 15 de julio, reguladora de los residuos. La Constitución Española otorga a las Comunidades Autónomas las facultades de establecer normas adicionales a las establecidas por el estado sobre la protección del medio ambiente.

Es en este contexto en el que se ubica el proyecto investigación *Reward*, concedido por la Unión Europea al CSTC (Bélgica), CEBTP (Francia), y en el que el ITeC colabora activamente aportando información referente a la situación de nuestro país. Este proyecto tiene como objetivo potenciar el mercado de la reutilización del árido procedente de residuos de demolición a partir de diferentes ensayos que validen sus propiedades y de la elaboración de documentos normativos que regulen su uso. En definitiva, se trata de adquirir el conocimiento necesario para poder convertirse en pioneros en el uso de material reciclado.

Un breve repaso a las estadísticas de la época pone de manifiesto, como muestra la Figura 14.56; que los vertidos incontrolados son todavía una práctica generalizada en la totalidad del territorio. No obstante, es importante mencionar que estos atentados ambientales (muchos de ellos consecuencia del pobre parque de instalaciones legalizadas), cohabitan con algunas iniciativas singulares de buenas prácticas que, desgraciadamente, han acabado por convertirse en meras anécdotas a pesar de resultar favorables tanto desde el punto de vista ambiental como del económico.

En consonancia con lo anterior, no es difícil de entender que el objetivo principal desde el punto de vista administrativo en esos años sea el despliegue del mayor número posible de instalaciones de vertido, con suficiente capacidad para poder absorber el volumen de los residuos generados por la industria de la construcción, que atraviesa un periodo de bonanza.

El modelo de gestión promulgado en Cataluña en el Decreto 201/1994, de 21 de junio, regulador de

Figura 14.56. Vertedero incontrolado de RCyD. Fuente: ITeC.

los derribos y de otros residuos de la construcción, basado en una fianza retornable en el momento en que se justifique que la totalidad de los residuos se han derivado hacia un vertedero autorizado, se convierte en una herramienta esencial para involucrar a las empresas constructoras y transportistas y erradicar los vertidos incontrolados.

La publicación de la Guía de Aplicación del anterior decreto que incorpora, entre otros datos, unas tablas de estimación de los residuos de obras de construcción y de demolición que permitan fijar *a priori* las tasas a depositar en el momento de solicitar la licencia de obra, complementa el paquete de medidas adoptadas por la Junta de Residuos de Cataluña (Empresa de titularidad pública desde 1993 y organismo competente en material de residuos en esta Comunidad).

Un primer programa de gestión de los CDR: el Programa de Gestión de Residuos de la Construcción y Demolición de Cataluña —PROGROC— establece unas pautas de evolución a corto y medio plazo, concretamente entre 1996 y el año 2000, con la finalidad mejorar el marco de gestión de los residuos en el ámbito Catalán.

El PROGROC, estructurado a partir de los ejes siguientes, establece unos objetivos de reciclaje y de reutilización ambiciosos, que se ven truncados principalmente por la dificultad de implantar buenas prácticas de gestión en obra entre los distintos agentes que intervienen en el proceso constructivo.

- Eje 1. Prevención.
- Eje 2. Valorización.
- Eje 3. Deposición del desecho en depósitos controlados.
- Eje 4. Despliegue del modelo de gestión.
- Eje 5. Criterios para el desarrollo de las infraestructuras.
- Eje 6. Actividades de divulgación y formación.

La obtención de un residuo de calidad, es decir, correctamente clasificado para poder optar a su posterior reciclaje, puede ser una utopía difícil de solventar atendiendo a la falta de sensibilización que afecta a cada uno de los componentes de un sector que se caracteriza por un elevado índice de atomización (promotor, arquitecto constructor, subcontratas, operarios de plantilla, operarios itinerantes, transportistas, gestores de residuos, industriales y suministradores de materias primas, etc.). Se pone a disposición del sector documentos que se podrían englobar en dos categorías: los proyectos dirigidos hacia la normalización de la calidad del árido reciclado y los proyectos centrados en la formación de arquitectos, promotores, constructores y operarios, con los que se pretende potenciar la minimización y la correcta gestión de los residuos de construcción y demolición, la redacción de planes de gestión de residuos, etc.

Mientras tanto, es el momento de plantearse cuál es la perspectiva Europea y tratar de analizar seriamente cuales son los países que se han subido verdaderamente al tren del reciclaje, así como las causas que han favorecido o limitado esta opción. En primer lugar, se deben revisar los índices de reciclaje de distintos países de la Unión y relacionarlos con el coste de vertido y con el coste por m^2 construido. Los países cuyas estadísticas muestran un porcentaje de reciclaje elevado acostumbran a tener tasas de vertido mayores.

En segundo lugar, es necesario observar las acciones emprendidas por la UE para alcanzar los objetivos fijados en los Programas Marco en materia de medio ambiente donde, tanto la prevención de la generación de residuos como el ahorro de recursos naturales, tienen un papel protagonista en sus sucesivas ediciones.

En 1998 la Unión Europea insta al Comité Europeo de Normalización (*Mandate to CEN/CENELEC M125*) a la redacción de normativa específica que contemple el uso de áridos para morteros, para hormigón, para su uso en capas estructurales de firmes, etc., independientemente de que el origen del árido sea natural o reciclado. La respuesta a este mandato se concreta en el año 2002 con la publicación diferentes normas EN relacionadas con materiales granulares (EN-13055-1:2002, EN 13139:2002, EN-13242:2002, EN 12620:2002, etc.), que establecen un periodo de coexistencia que finaliza en junio de 2004 y durante el cual cada país miembro debe responsabilizarse de adecuar la normativa estatal que pueda verse afectada por las modificaciones impuestas en cada una de las normas citadas.

Paralelamente, la Estrategia comunitaria de gestión de RCD va concretando objetivos y medidas con la voluntad de acercarse a un nivel de reciclaje significativo. España despierta de su letargo con el Plan Nacional de Residuos de la Construcción y Demolición 2001-2006, estableciendo unos objetivos de reciclaje ambiciosos que den respuesta a las exigencias europeas, y se hallan reflejados en la Tabla 14.25.

Sin duda, la heterogeneidad de realidades del territorio estatal ha impedido hasta el momento avanzar a la misma velocidad que algunas autonomías como la del País Vasco y Navarra.

Tabla 14.25. Exigencias europeas para reciclaje de residuos de construcción

Objetivos de valorización (reciclaje y reutilización) de los RCD					
Estrategia Europea de Residuos		PROGROC 2001-2006 (Julio de 2001)		PNRCD 2001-2006 (Junio de 2001)	
2005	2010	2003	2006	2005	2006
50%-70%	70%- 85%	33%	85%	40%	60%

7.3. PERSPECTIVAS ACTUALES EN EL RECICLAJE DE RDC

Con el objetivo de vislumbrar soluciones que favorezcan el reciclaje en la construcción, se hace necesario independizar los conceptos siguientes: la minimización y la clasificación en obra del reciclaje de los residuos, y en este último caso, separar lo que pertenece a los residuos de obra de lo que es, exclusivamente, residuo de demolición.

Con este análisis no se pretende otra cosa que desgranar aquellas acciones que afectan directamente al reciclaje para poder asignar a cada uno de los agentes la responsabilidad que le concierne.

La minimización en obra depende, fundamentalmente, de que el proyecto considere:

- Optimizar las soluciones constructivas al efecto de reducir la cantidad de material empleado.
- Prescribir los materiales de forma que se den preferencia a los que generan menos residuos y/o a los que el fabricante propone una forma idónea de gestión.
- Modular la arquitectura respecto a los materiales mayoritarios al efecto de evitar recortes en obra.

Por el contrario, la situación de la construcción actual cabe adjetivarla de singular ya que tiende a resolver su ajuste a cualquier nuevo requisito con más material, es decir, con más peso. La construcción es el único campo del diseño que no tiene por objetivo básico la reducción de material en sus propuestas.

También parece singular la posición de la mayor parte de arquitectos que han renunciado a modular sus obras. Es cierto que el sector de la construcción nunca ha consensuado unos criterios de coordinación modular para el conjunto de materiales y productos de la construcción pero, atendiendo a los criterios de reducción de residuos, bastaría hacerlo respecto a los materiales mayoritarios. Es incomprensible que no se modulen, por ejemplo, las fachadas de fábrica vista o los espacios interiores respecto la medida de la pieza escogida como pavimento.

La minimización también depende del buen trato que se aplique a los materiales nuevos por parte del personal de la obra. Una buena cantidad de material suele convertirse en residuo antes de su empleo.

Las operaciones de clasificación dependen fundamentalmente del contratista, es decir, de la figura capaz de arbitrar el personal y los medios auxiliares idóneos para esta función. Está claro que esta tarea es imposible de afrontar si el proyecto no ha incluido una partida de obra específica que la considere y si el solar no dispone de superficie para implantar los contenedores necesarios. Pero llega a devenir absurda si se carece de medios para gestionar el producto clasificado (reciclarlo y usarlo en la misma obra o llevarlo a una central de tratamiento, por ejemplo) ya que, clasificado o no, sin las infraestructuras necesarias, se acabaría destinando los residuos a vertedero.

El reciclaje en obra es el complemento idóneo de la clasificación. Si se arbitra una pequeña central de tratamiento (machaqueo de la fracción pétrea, compactadora de plásticos y de papel, etc.) se puede producir un producto, que:

- Sea usado en forma de rellenos (áridos para subbases, drenajes, etc.).
- Se reduzca su volumen y se mejore por tanto sus condiciones de transporte.
- Sea aceptado por un reciclador externo.

En definitiva, que se cierre el ciclo de los materiales y que se imite, en la medida de lo posible, a los ciclos naturales.

Las recomendaciones actuales de la Unión Europea van en el sentido de que los países miembros aumenten su nivel de valorización hasta alcanzar el 85% del volumen total de residuos en el año 2010. Frente a ello, la última edición del PROGROC se proponía alcanzar en Cataluña el 85% en 2006, y la realidad medida estimada por la propia Agencia de Residuos apenas llega al 5%.

En el DVD adjunto, en el punto 8, se muestra información sobre maquinaria ligera para el tratamiento de los RDC.

Por suerte se ha producido un cierto fenómeno que ha resultado favorable. Algunos constructores han adquirido maquinaria ligera y autotransportable para el machaqueo de áridos en la propia obra. La intención inicial, hoy plena realidad, era la de afrontar

los derribos de forma más sostenible, con una mentalidad más de constructor que de demoledor. Se intentaba encontrar provecho económico en la sustitución del derribo masivo, sin posibilidad alguna de acceder al reciclaje de los residuos generados, por otras formas de derribo, algo más selectivas, que permitieran una cierta separación por materiales y la posibilidad de machacar la fracción pétrea. Este producto machacado se emplearía en la estructuración de los viales de la futura urbanización.

Esta operación, como muestra la Figura 14.57 se ha realizado en diversas promociones importantes con un éxito incuestionable tanto en el aspecto medioambiental (ahorro de vertedero y ahorro de materias primas) como económico.

Esta forma de actuar se ha ido generalizando de modo que el mercado de los grandes derribos se está organizando a partir de una doble oferta: la demolición rápida, masiva y transporte a vertedero de los restos sin posibilidad de recuperar nada y la demolición algo más selectiva, el machaqueo de la fracción pétrea (del 70 al 80% del total) y el acopio en la propia urbanización del material tratado para su uso posterior.

El costo monetario de ambas operaciones hoy es prácticamente el mismo, sin embargo el promotor tiene a su disposición una considerable cantidad de material de calidad suficiente para realizar la base y la subbase de los pavimentos rodados que, de otra forma, tendría que comprar. Si se considera el conjunto de estas actuaciones (que no son controladas por la autoridad ambiental, ya que no aportan material a los vertederos) la relación volumen reciclado/volumen total de residuos es del orden del 20%, lo cual se acerca a los objetivos europeos. Se puede concluir por tanto, que el éxito del reciclaje en la construcción depende de la responsabilidad compartida entre los distintos agentes que participan del proceso constructivo soportados por un marco legal favorable.

En junio de 2006, durante la redacción de este texto, España tiene en marcha diferentes proyectos que cabe destacar dada su relevancia:

- Borrador del anejo ambiental de la EHE —Instrucción de Hormigón Estructural—, en el que se dan reglas para el uso de árido reciclado en las hormigones.
- Borrador de Real Decreto por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición y mediante el cual se plantea la obligatoriedad de que los proyectos de construcción y de demolición incorporen planes de gestión de residuos y partidas presupuestarias específicas.

En el DVD adjunto, en el punto 9, se reproduce el citado RD.

Figuras 14.57. Reutilización y reciclaje de RDC *in situ*. Fuente: ITeC.

- Comité Nacional de Normalización AEN/ CTN154 «Áridos» SC-3 Subcomité de Carreteras, desde donde se están elaborando guías para dar soporte a la correcta utilización de áridos reciclados en obra pública, y a la elaboración de los pliegos de prescripciones técnicas particulares.

Este avance normativo llega en un momento en el que la mayor parte de las grandes empresas constructoras y promotoras, a pesar de haberse mostrado reacias a la aplicación generalizada de buenas prácticas ambientales durante los últimos años, ya han madurado los sistemas de gestión ambiental tipo ISO 14001 o bien han asumido que en la actualidad, lo que se considera ambientalmente sostenible puede convertirse claramente en un argumento más de venta.

Sea por una razón o por otra, la implicación de las empresas constructoras para tratar de resolver la problemática asociada a la correcta gestión de los residuos es cada vez más elevada. Es más, el sector de la construcción comienza a tener en cuenta la importancia del conocimiento de los impactos ambientales generados por el desarrollo de su actividad para la búsqueda de soluciones compatibles con las nuevas políticas de desarrollo sostenible.

En los últimos años se han llevado a cabo iniciativas tan sugerentes como el proyecto europeo *Recons (*2003-2006). Que coordinado por el Gremio de Constructores de Barcelona y Comarcas (constituido básicamente por pequeñas y medianas empresas), ha tenido como objetivo fundamental la creación de un sistema de gestión ambiental cooperativo para reducir la carga económica y documental de las distintas empresas agremiadas hubieran tenido que asumir de forma individual.

En el DVD adjunto, en el punto 10, se reproduce el citado proyecto Recons.

Otra iniciativa, a imagen y semejanza de la Bolsa de Subproductos de Cataluña, es la futura creación de una Bolsa de Tierras de Cataluña. Cuando se inicia una obra, el volumen de tierras que hay que desplazar es enorme (cada vez hay mas aparcamientos subterráneos, trasteros o piscinas). Se trata de un material, por lo general muy limpio (no está considerado residuo) que puede almacenarse temporalmente para ser empleado en un desmonte o relleno. Lo que persigue la Bolsa es crear una logística que permita pasar de la excavación directamente al relleno, sin almacenamiento intermedio.

7.4. RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN

La arquitectura es una actividad que tiene relación directa con la sostenibilidad, ya sea en su origen: la materia prima para fabricar los materiales, durante la obra con el impacto paisajístico y con los residuos generados durante la construcción y, sobre todo, los residuos que ocasiona la demolición. Obviamente este apartado va encaminado a comentar los aspectos relacionados con esta última actividad.

En análisis ambiental de la actividad de la construcción exige, por lo menos, valorar tres vectores:

- La integración de las edificaciones ya sea en el medio urbano o rural, según corresponda.
- La aplicación de aquellos instrumentos que faciliten el ahorro de recursos, como electricidad y agua, durante todo el ciclo de la construcción.
- El uso correcto de los residuos en la doble vertiente: la reutilización de materiales en la vivienda nueva o en la restauración. Que la deconstrucción permita la reutilización de los residuos.

Desde el punto de vista de los materiales de construcción no se dispone, en la actualidad, de una evaluación aceptada y ordenada para la clasificación de los materiales de construcción y su relación con el medio ambiente. Sin embargo, los criterios que se avanzan en los apartados siguientes van en esta dirección:

- Utilizar materiales que sean fácilmente reciclables. En este sentido deben dejarse en segundo lugar los denominados materiales compuestos ya que presentan ciertas dificultades a la hora de su tratamiento.
- Aplicar el análisis de ciclo de vida a los diversos materiales de construcción. Ello arroja luz sobre el previsible impacto en el uso de uno u otro material. Por ejemplo sobre la energía gastada en la extracción y en el proceso de fabricación de un determinado material.
- Respetar los ecodiseños y los criterios que favorezcan el peso mínimo, a igualdad de prestaciones técnicas, puesto que el impacto en transporte y colocación es menor.
- La durabilidad. Esta propiedad debe prevalecer sobre otras estimaciones pasajeras como la moda o la oportunidad. En construcción se fija una edad de 100 años como meta ideal.
- La promoción de materiales de construcción elaborados a partir de residuos y la reutilización de residuos de la construcción.

- La cantidad de energía asociada a la materia prima, la utiliza en la fabricación de un material y la naturaleza de la misma.
- Los efectos secundarios derivados del empleo de un determinado material. Ya sea su naturaleza tóxica, radioactividad, etc.

El rendimiento de la demolición es un aspecto complejo de valorar. Partiendo de la base de que el material que hay que demoler es el apropiado, la valoración económica es el parámetro más decisivo a la hora de tomar la decisión de aprovechar el material procedente de derribo a emplear uno de nuevo. Así la manipulación y transporte de material ocasionará un coste creciente en función de la masa de material a reciclar. Inversamente: el coste de la demolición será tanto más reducido cuanto mayor sea la obra a demoler (debido a la incidencia del coste de traslado e instalación de la maquinaria específica). Así pues se trata de dos curvas de costes cuya intersección determinará la dimensión óptima de la obra a demoler.

El término residuos de la construcción es muy amplio y dentro del mismo cabe diferenciar claramente tres subgrupos:

- Residuos procedentes de la demolición, ya sea de edificios, obras públicas, carreteras, etc.
- Residuos de excavaciones y movimientos de tierra, son básicamente arcillas, tierras, arenas, etc. que resultan sobrantes a la hora de ejecutar la obra.
- Residuos mixtos o aquellos que se generan durante la construcción, restos de materiales de construcción, embalajes,...

En conjunto representan un volumen muy importante, ya en España suponen algo más del 7% del total de los residuos, o sea algo así como 2 kg/persona y día.

Otras cifras que dan idea de la magnitud son:

- Se generan 900 kg/m^2 de residuos en una demolición.
- Se producen 200 kg/m^2 de residuos en una obra nueva.

Pese a ser una cantidad tan importante se calcula que el 85% del mismo es un residuo inerte. No obstante el 15% restante hay que prestarle atención ya que contiene residuos especiales como amianto, pinturas, lámparas, metales, etc. De ahí la importancia de la demolición controlada y selectiva para evitar contaminaciones y potenciar la utilización posterior.

De los residuos señalados, son los del primer grupo los que merecen un interés especial, dado que los procedentes de excavación son parecidos a las tierras generados en grandes cantidades, que han sido comentados con anterioridad. Los residuos generados durante las obras nuevas, al no representar una gran cantidad, deberían minimizarse.

En cuanto a la distribución por áreas, los residuos proceden de:

- 70% de la edificación.
- 20% de edificios industriales.
- 10% de obra pública.

La Figura 14.58 muestra la distribución típica de los materiales que constituyen una edificación en Europa, si se exceptúan las tierras y los asfaltos.

7.4.1. Gestión de los residuos de la construcción en la UE

A pesar de que los objetivos del reciclaje van encaminados a una conservación de recursos naturales y a una mayor protección del medio ambiente, se puede

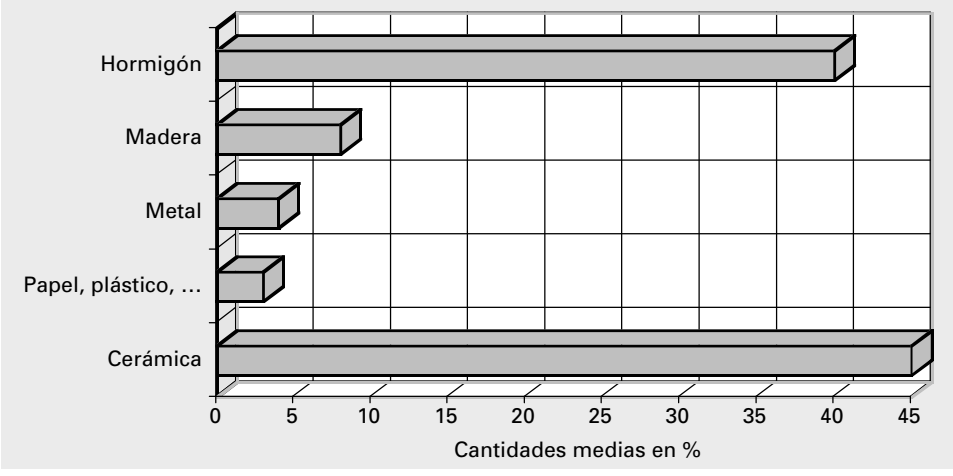


Figura 14.58. Composición de los residuos de la construcción en la UE.

afirmar, en general, que en Europa el móvil principal que ha dinamizado la implantación de las plantas de reciclaje, es el económico. Entre los motivos más destacados cabe contemplar la falta de granulados naturales aptos para la construcción.

La mayoría de los países que reciclan derribos han evolucionado de la misma manera. Primero han comenzado aprovechando el residuo de la construcción para recuperar perfiles, rellenando desmontes y construyendo subbases. Con el tiempo han introducido otras aplicaciones que requieren más experiencia y cuidado en la ejecución, como es la fabricación de hormigones con áridos recuperados.

El tipo y la cantidad de residuos de la construcción generados dependen de las características constructivas y del nivel económico del país. En el año 1992 la EDA (*European Demolition Association*) realizó un estudio sobre la cantidad de residuos de demolición y construcción generados por la construcción en diferentes países europeos. Los resultados del trabajo se resumen a continuación.

El reciclaje de los residuos de la construcción, así como sus usos potenciales, están condicionados por su composición. Los derribos de construcción están formados por un número de componentes diferentes que no son fácilmente separables.

En los países del centro y el norte de Europa, los residuos de la construcción eran vertidos, hasta la década de los años 80, generalmente en lugares habilitados para su tratamiento. En el transcurso del último decenio, el reciclaje se ha convertido en otro medio de utilización de los residuos de la construcción. En los Países Bajos se recicla más de la mitad de los residuos generados. Para el año 2000, todos los países de la UE habían previsto un aumento en la proporción de residuos que serán reciclados. El crecimiento varía del 26 al 61% respecto del total de los residuos de la construcción reciclados.

7.5. ASPECTOS PELIGROSOS DE LA DEMOLICIÓN. EL AMIANTO

Durante los trabajos de demolición deben observarse plenamente las disposiciones del Plan de Seguridad e Higiene, tanto en lo que atañe al personal afectado directamente como a las posibles implicaciones en las obras y/o edificaciones colindantes. Uno de los aspectos importantes es la valoración que pueda tener la contaminación de polvo, en particular si la obra a demoler contiene amianto. Los peligros para la salud que se derivan de la presencia de fibras de amianto en el ambiente laboral, y por extensión a la inmisión de las fibras, se manifiestan en diversas enfermedades profesionales específicas (Real Decreto 1995/1978, de 12 de mayo). Las enfermedades que pueden desarrollase por la inhalación de fibras de amianto son: asbestosis, carcinoma primitivo de bronquio y pulmón y masotelina pleural.

Los materiales que contienen amianto en forma de fibras o polvo son los más peligrosos, puesto que las fibras no están sujetas a una matriz que los retenga. En la hipótesis de que la fibra se halle retenida, la demolición también deberá realizarse de forma cuidadosa de manera de que no se produzca polvo o abrasión que pueda liberar fibras.

Las principales aplicaciones industriales del amianto en el ámbito de la construcción se exponen en la Tabla 14.26.

Tabla 14.26. Principales aplicaciones industriales del amianto

Tuberías de amianto-cemento	Tuberías de presión. Tuberías de drenaje. Conducciones de aireación y venteo. Protección de cables.
Placas y tejas de amianto-cemento	Placas para tejados y cubiertas. Protección de cerramientos. Torres de refrigeración. Plafones de separación. Instalaciones industriales.
Accesorios de amianto-cemento	Accesorios en general. Depósitos de agua. Macetas y jardineras. Plásticos vinílicos reforzados con amianto.
Materiales de fricción	Zapatas y placas de frenos. Discos de embrague. Bandas de freno de volantes, inercia.
Material de aislamiento	Material fibroso para aislamiento de techos y paredes. Placas contra el fuego. Material aislante para tuberías.
Varios	Recubrimientos sellantes. Papeles aislantes y asfálticos.

En el ámbito internacional, la *American Conference of Governmental Industrial Hygienist,* del año 1995 limita a 0,2 fibras/m^3 la cantidad de material fibroso en el ambiente.

7.5.1. Residuos con alto contenido en asbesto

La tremolita y, sobre todo, la serpentina presenta una variedad fibrosa: el crisotilo que se emplea como material asbestiforme. Mineralógicamente son sili-

catos complejos de magnesio, hierro y calcio hidratados. Al tratarse de un material fibroso e ignífugo se ha utilizado para la fabricación de materiales resistentes al fuego y mezclado con cemento para la fabricación de materiales de construcción.

Hace mucho tiempo se descubrió que la exposición de los materiales con asbesto a la acción combinada del calor y el aire desprendía polvo (fibras. Estas suelen tener un diámetro de 5 mm) que producía la asbestosis, cuadro clínico que degenera en cáncer de pulmón. En esta tesitura el problema es doble: los materiales fabricados con asbesto son peligrosos pero, la demolición de una edificación que lo contenga todavía lo es más por cuanto origina una gran cantidad de polvo rico en asbesto.

En España se construye mucho con hormigón paro la mayoría de países centroeuropeos usan la estructura de acero y la recubren con placas de asbesto.

Figura 14.59. Construcción con materiales que contienen asbesto.

En Francia el decreto 9/1/1997 obliga a depositar estos residuos en un vertedero de clase I o vitrificar. No se permiten más de 500 fibras/m^3. En 1999 la Comisión Europea elaboró una Directiva sobre la restricción del uso del amianto que se traspondrá a todos los países de la unión.

7.5.2. Tratamiento de los residuos con amianto

El asbesto se descompone sobre los 800 °C. Por tanto la ceramización es una buena tecnología para su tratamiento, siempre y cuando se sea muy escrupuloso en la etapa de la preparación de la pasta. Las ceramizaciones son un sistema seguro pero existe el peligro de que en la etapa de trituración se genere polvo. Por ello en determinados países se procura la vitrificación.

Hay que resaltar que la inertización de residuos peligrosos aconseja la gresificación. Así los ensayos con contenidos superiores al 40% de asbesto demuestran que es preciso alcanzar los 1.150 °C para gresificar la pasta cerámica.

Si bien es cierto que la temperatura depende del tipo de arcilla, o mezcla de arcillas usadas, los experimentos y ejemplos que se han descrito en el Capítulo 6 de esta obra, vienen a concluir que el rango de temperaturas ha de ser elevado.

7.6. EL RECICLADO DE LOS MATERIALES PROCEDENTES DE DERRIBO

La utilización más frecuente de los residuos procedentes de demolición de edificios consiste en su trituración y posterior empleo como árido y/o grava, para hormigones y/o morteros. La Tabla 14.27 mues-

Tabla 14.27. Reciclaje de residuos de construcción

País	Producción de residuos		Reciclaje		
	Total	Per capita	Total	Producción residuos %	Agregados naturales %
Francia	20-25	0,40	3	13	0,75
España	13	0,35	0,5	3,	0,2
Bélgica	7	0,75	2,2	29	5,8
Alemania	43	0,54	14,9	34,6	3,6
Reino Unido	24	0,35	11	45,8	3,8
Países Bajos	12	0,82	8,9	73	—
Total	**135-140**	**—**	**40,5**	**29,4**	**—**

tra la generación media de este tipo de residuos en algunos países de Europa, en datos de 1988, y al lado su tasa de reciclaje.

Sin duda, donde mayor es la tasa de reciclaje es en los Países Bajos y Alemania donde en el año 1995, la cifra alcanza los 525 kg de áridos reciclados por persona y año. Otra cifra a tener en cuenta es que, en Alemania, en 1995, el 5% del material reciclado procedía de construcción, exactamente, procedente de demolición.

Los granulados procedentes de derribo presentan unas características que los hacen útiles para la reutilización y devienen serios competidores de los áridos naturales. No obstante, presentan algunas particularidades que deben conocerse.

7.6.1. Características del «todo uno»

Es el material que resulta de machacar el material de derribo, previamente seleccionado, sin proceder a su posterior clasificación granulométrica. Presenta una notable capacidad de soporte, casi siempre con valores superiores a 50 (índice CBR), cuando el PG-4 especifica que ha de ser superior a 20.

En general no presenta problemas de hinchamiento, aunque esta característica dependerá de la cantidad de yeso y arcilla que contenga el material. Uno de los valores significativos es el índice de Los Ángeles, del orden de 34, mientras que el PG-4, especifica 35. Ello supone que él «todo uno» sea adecuado para aplicaciones de tránsito ligero.

En todos los casos el contenido de materia orgánica no puede ser superior al 0,5%.

7.6.2. Cuestiones relacionadas con el hormigón a reciclar

Se puede conseguir una notable reducción de los costes de reciclaje si las materias extrañas al hormigón se separan previamente a la demolición. Así deben ser eliminados, en la mayor cantidad posible, el vidrio, la madera, los metales, plásticos y, en particular las propias estructuras del armado.

El hormigón armado, el más habitual de los materiales estructurales de hoy en día, es un material costoso de reciclar, ya que es difícil separar el acero del hormigón.

En el DVD adjunto, en el punto 11, se muestra información sobre maquinaria pesada y transportable para la valorización de residuos de construcción.

7.7. CAMPOS DE APLICACIÓN DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS

Los hormigones que se obtienen con áridos procedentes de hormigón reciclado, tienen resistencias y durabilidad adecuadas y módulos más bajos que el hormigón original, lo que a menudo es una ventaja para pavimentos mixtos. No es difícil obtener hormigones con una resistencia, a los 7 días, de 4 a 15 MPa de resistencia a la compresión. En cualquier caso, añadiendo más cemento y/o utilizando una parte de áridos naturales, siempre es posible conseguir las prestaciones exigidas.

La aplicación de áridos reciclados en hormigones se halla perfectamente reglamentada en la mayoría de los países. En el caso de España, se ha constituido el comité CNT 146 de AENOR con el objetivo de elaborar una norma UNE.

En principio se definen tres categorías de áridos reciclados:

- Áridos mayoritariamente procedentes de escombros de albañilería.
- Áridos mayoritariamente procedentes de escombros de hormigón.
- Áridos compuestos por una mezcla de áridos reciclados.

Es también habitual emplear áridos reciclados que cumplan las especificaciones en cuanto a distribución granulométrica, estabilidad volumétrica y mantenimiento de la capacidad portante, para rellenos y suelos.

Tampoco existe problema para el uso de materiales reciclados para cimentaciones de edificaciones ligeras, viviendas unifamiliares, garajes, etc., aunque se deben evitar los contenidos elevados de yeso y madera.

Las fracciones finas obtenidas en la trituración se pueden utilizar en la mejora de la granulometría de suelos y, eventualmente, para la neutralización de suelos ácidos, habida cuenta del carácter alcalino de estos materiales. En este caso debe extremarse la necesidad de eliminar la máxima cantidad de yeso.

En aquellas comunidades en las que es relativamente fácil y económica la realización de vertidos, la introducción sistemática del reciclaje puede resultar bastante difícil. Para que las empresas sientan la necesidad de reciclar, o bien para que surjan nuevas empresas recicladoras, es necesario que las autoridades emprendan una exhaustiva política de control y de minimización de los vertidos.

Es importante señalar que en cada país existe un nivel diferente de restricción impuesto por las autoridades sobre los vertidos de los residuos de la construcción. Así en Alemania y Países Bajos, los residuos han de ser conducidos hacia el reciclaje antes que al vertido.

Existe un incremento en el consumo de cemento, en comparación a una determinada calidad de hormigón convencional, suele requerir un 5% de más para los áridos reciclados.

La situación actual de diferentes países europeos respecto al vertido de derribos de la construcción se resume en el cuadro siguiente:

Bélgica:	Los residuos pueden ser vertidos, pero el control es insuficiente.
Alemania:	Esta prohibido el vertido de los materiales que son reciclables.
Dinamarca:	Los vertidos se realizan sobre zonas controladas.
Francia:	Restricciones en los vertidos de los materiales inertes.
Irlanda:	Es necesaria una autorización para llevar a cabo un vertido.
Italia:	Generalmente los residuos han de ser vertidos en lugares específicos para esta función.
España:	El vertido de residuos se ha de realizar en los lugares autorizados.
G. Bretaña:	El vertido de todos los residuos se suele hacer en un lugar autorizado.
Países Bajos:	Hay depósitos que no aceptan los residuos que son reciclables o han de ser reciclados.

7.8. MATERIAL RECICLADO PARA SUBBASES

Normalmente, en la construcción de carreteras y vías se utiliza una gran cantidad de materiales de muy baja cualificación para el relleno de vaguadas, explanadas, bases y subbases, ya sea introduciendo cambios en la topografía para adaptar el trazado de una vía o para constituir un soporte adecuado capaz de transmitir los grandes esfuerzos que se producirán en la superficie, o bien para adaptar a la carretera de un sustrato de drenaje.

Para suministrar dichos materiales se suelen emplear materiales procedentes de las excavaciones realizadas en el mismo lugar donde se hayan llevado a cabo las obras, lo que en muchas ocasiones no constituye un material adecuado.

La sección tipo de una carretera es la que se halla representada en la Figura 14.60. Las capas superiores de la sección han de ser más resistentes a la flexión, a la cizalla y deben ser drenantes. A medida que las capas son interiores su misión consiste, simplemente, en transmitir los esfuerzos de compresión, debido a ello las prestaciones mecánicas pueden ser inferiores.

Figura 14.60. Sección tipo de una carretera.

La demolición de subcapas de carreteras y de derribos de obras públicas, debidamente machacada proporciona un árido que cumple la normativa para zahorra artificial que establece el Pliego de Condiciones Generales para Obras de Carreteras.

Por lo que hace referencia a la demolición de edificios, una vez separados los plásticos, papeles y maderas, se tritura el resto y se prepara un árido con el que pueden confeccionarse toda clase de capas, subcapas y subbases.

7.9. MAQUINARIA PARA LA TRITURACIÓN DE LOS RESIDUOS DE DEMOLICIÓN

Son plantas destinadas a la trituración, cribado y selección de material procedente de demolición. En general se puede distinguir dos clases de centrales recicladoras: las que producen material para «todo uno» y las que fabrican granulados para hormigón. Las primeras sólo disponen de una machacadora, mientras que las segundas precisan de una maquinaria más variada y extensa para asegurar un control de calidad del producto.

La máquina fundamental de estas instalaciones es el molino. De ellos existen dos variantes principales:

- *Molino de impacto:* Consiste en un rotor, en cuyo eje se hallan barras o martillos insertos, que gira a gran velocidad en el interior de una cámara. El material cae al interior y es desintegrado por impacto al chocar contra el rotor y rebotar contra las paredes. La parte inferior de la cámara está constituida por una parrilla con una abertura que fijan el tamaño máximo de salida. Este tipo de molino produce mucho polvo. No obstante es una máquina muy adecuada para la fabricación de «todo uno».

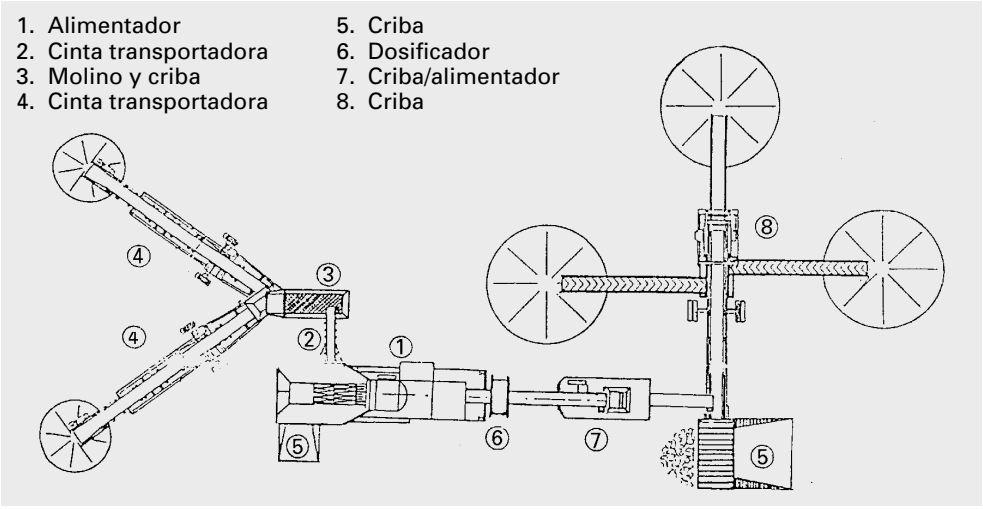


Figura 14.61. Esquema de una planta de trituración móvil.

Hay que tener presente que en una alta producción de material en la banda fina de la curva granulométrica facilita la adecuación a una distribución granulométrica óptima para rellenos, incluso para subbases y bases de carreteras.

- *Machacadora de mandíbulas:* La máquina consta de una coraza fija y otra, idéntica, animada de movimiento que produce un acercamiento gradual y oscilatorio hacia la coraza fija. Funciona por compresión y cizalla y es adecuada para romper grandes bloques, produciendo poco polvo.
  Los granos producidos acostumbran a presentar caras planas y ello la hace indicada para la producción de áridos para el hormigón.
  Todas las instalaciones disponen de un separador magnético que retira los metales férreos y, por medio de una cinta transportadora, los apila aparte.

La Figura 14.61 y la 14.62 muestran un esquema de la maquinaria básica para el tratamiento de los residuos de demolición de edificios.

Este tipo de maquinaria suele ser móvil y se desplaza al punto donde se lleva a cabo la demolición. De esta forma se posibilita minimizar los costes.

7.9.1. Instalaciones fijas para la producción de árido reciclado

En esencia son similares a las descritas pero al tratarse de una planta fija permite un mayor grado de sofisticación, un mayor rendimiento de producción y, por razones de economía de escala resulta un coste menor.

La Figura 14.63 muestra el esquema de una instalación fija.

En el DVD adjunto, en el punto 12, se muestra información sobre sistemas de valorización de RDC y planta de valorización de escombros.

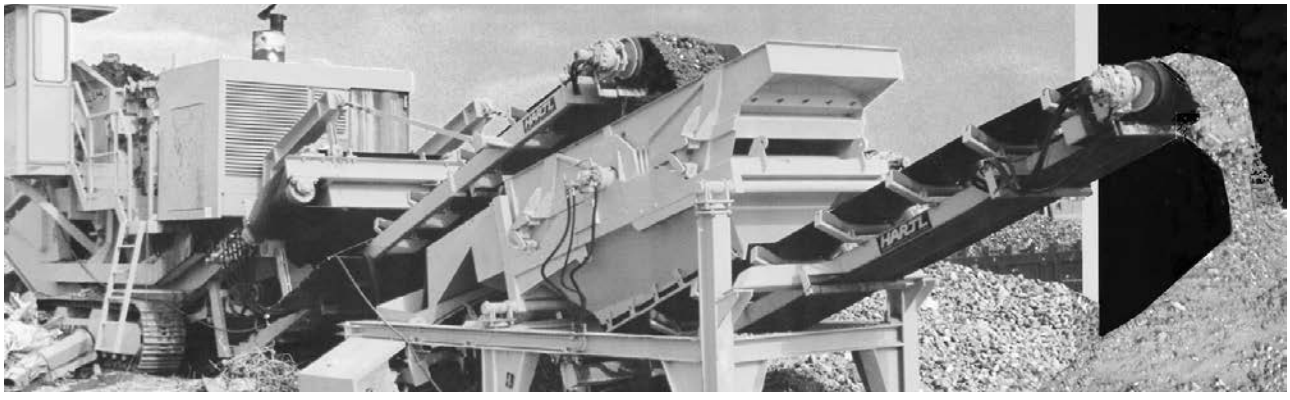
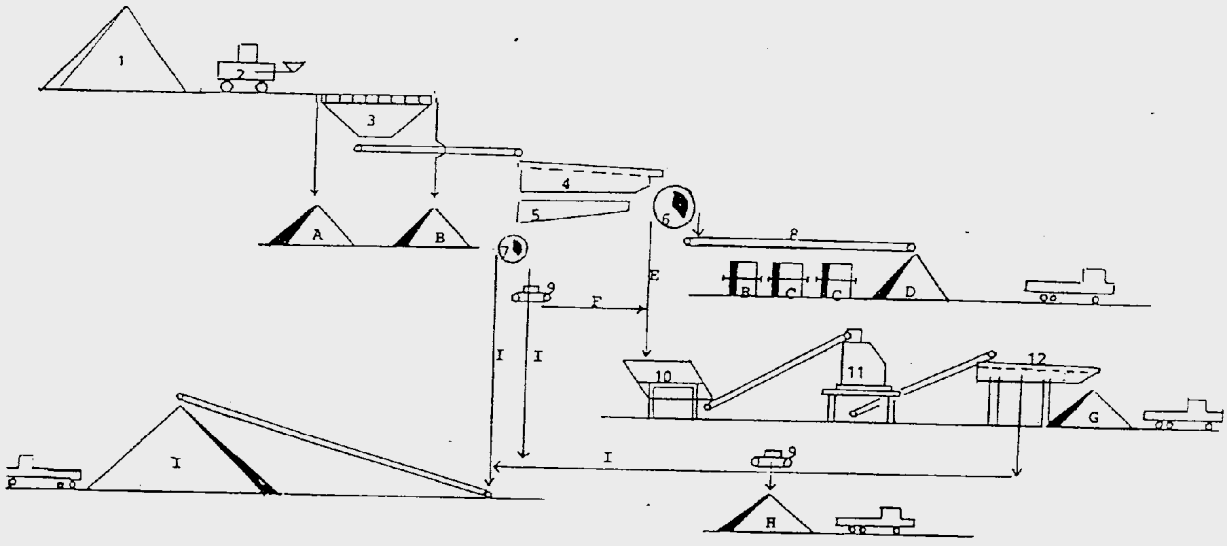


Figura 14.62. Maquinaria de trituración de RCD.



1 = Almacén interm., escoria cruda
2 = Cargadora
3 = Tolva de alim., precriba > 400 mm
4 = Criba 40 mm, mallas alargadas
5 = Canaleta vibratoria
6 = Imán, tipo tambor
7 = Imán, tipo tambor
8 = Cinta de selección manual
9 = Imanes, por encima de las cintas
10 = Tolva de alim. para chatarra
11 = Machacadora
12 = Criba 10 mm, mallas alargadas
A = Chatarra férrica > 40 mm
B = Restos combustibles, no quemados
C = Metales no férricos
D = Granos inertes de sobremedida
E = Chatarra > 40 mm - 1. fase de separación
F = Chatarra < 40 mm - 1. fase de separación
G = Chatarra > 40 mm - tratamiento posterior, resultado >90% férrica (limpia de adhesivos no deseados)
H = Chatarra < 40 mm - tratamiento posterior, resultado >90% férrica (limpia de adhesivos no deseados)
I = Escoria procesada

Figura 14.63. Esquema de una planta de trituración fija.

8. Posibilidades de recuperación de suelos contaminados

Una reciente sentencia del alto tribunal europeo en materia de medio ambiente ha declarado que los vertederos más gestionados podrán considerarse como lugares o suelos contaminados, de ahí esta breve introducción a las prácticas deficientes que lamentablemente se han empleado para la ubicación de vertederos.

8.1. ELEMENTOS PARA LA CONFECCIÓN DE VERTEDEROS

En muchos países de la UE hasta que no se ha incorporado una ley unificadora para el vertido de residuos, se han empleado algunos materiales que, con mayor o menor fortuna, pueden servir para la contención de la contaminación.

8.1.1. Expansión natural de algunas arcillas

Todos los minerales de arcilla se comportan de manera diferente. Uno de ellos, la bentonita, que pertenece a la familia de las montmorillonitas, presenta un comportamiento especial en contacto con el agua.

Como indica la Tabla 14.28 el tamaño de la partícula condiciona una serie de propiedades como la superficie específica. En el caso de las bentonitas ésta es muy alta y su estructura filamentosa propicia que el agua se introduzca entre las láminas y quede adsorbida. De este modo se hincha hasta alcanzar un volumen notable.

Esta propiedad es muy apreciada para la fabricación de geomembranas. Estas son mallas impregnadas de bentonita. Cuando se moja se hincha y pro-

Tabla 14.28. Propiedades de algunos minerales de arcilla

Mineral	Tamaño de la partícula (μm) %	Superficie específica (m^2/g)	Expansión máxima (libre)
Montmorillonita	0,001	600-800	350-1.500
Illita	0,003-0,1	65-100	150-350
Caolinita	0,5-2	5-30	(despreciable)

porciona un excelente cierre hermético y ello es muy apreciado en la construcción de vertederos. De ello se deduce que para que la geomembrana sea activa, hay que asegurarse de que el mineral de arcilla esté hinchado.

8.1.2. Aplicación del polietileno de alta densidad en las infraestructuras de impermeabilización

El uso de estériles y otros residuos generados en grandes cantidades, conlleva extremar las medidas de impermeabilización para prevenir posibles riesgos de infiltraciones y/o lixiviados. Un caso especial son los rellenos que se realizan para destinarlos a depósitos de residuos.

Existen diferentes clases de depósitos, atendiendo a la composición y a la naturaleza de los residuos que van a ser depositados.

- Depósitos para residuos peligrosos.
- Depósitos para residuos no peligrosos (entre ellos los depósitos de RSU).
- Depósitos para residuos inertes.

En la fase de estudio previo al emplazamiento de un depósito controlado de residuos son varios los factores que hay que considerar y cuantificar, y en especial la permeabilidad o impermeabilidad natural del terreno. En la práctica, se dan normalmente alguno de los siguientes casos.

- Impermeabilidad natural del terreno, de elevada potencia.
- Impermeabilidad natural del terreno, de escasa potencia.
- Riesgo de permeabilidad.
- Permeabilidad.

Los terrenos clasificados como 2, 3 y 4 es necesario tener en cuenta las denominadas «barreras artificiales» y la correspondiente estratigrafía de impermeabilización asociada a las mismas (geomembranas y materiales geosintéticos). El concepto de «estratigrafía» hace referencia a la disposición, en un determinado orden, de una serie de materiales naturales y artificiales, cumpliendo en su conjunto, una determinada misión. La experiencia muestra que los mejores resultados, para una determinada estratigrafía, se obtienen combinando las geomembranas con ciertos materiales naturales. Es necesario, por tanto, valorar la utilización de materiales naturales en función de las siguientes situaciones.

- Materiales naturales adecuados que están presentes en el fondo del depósito. Se ha de considerar la naturaleza, la potencia y el espesor.
- Materiales naturales adecuados presentes en el fondo del depósito pero no dispuestos de forma adecuada. Se ha de considerar la manipulación mecánica (extracción, carga, transporte, descarga, extendido, compactación y nivelación).
- Materiales naturales adecuados no presentes ni en el fondo del depósito, ni próximos a la zona.

Según la presencia o no de materiales naturales adecuados a la ubicación del vaso del depósito será necesario la aplicación de geomembranas y geocompuestos (barreras artificiales). Las láminas de polietileno de alta densidad (PEAD) son empleadas para la impermeabilización de fondos de depósitos, balsas de lixiviados, balsas de purines, etc.

En el comportamiento en servicio de las láminas de PEAD, influyen las materias primas empleadas en su fabricación, el propio sistema de fabricación, la preparación del vaso, la colocación y el montaje de la lámina. El posible riesgo de deterioro del sistema de impermeabilización, referido únicamente a las láminas de PEAD se cuantifica en el cuadro de la Tabla 14.29.

Tabla 14.29. Riesgo en el uso de la lámina de PEAD

Causa	% de riesgo
Fabricación y defectos en las materias primas componentes	20%
Preparación del vaso y estratigrafía adoptada	20%
Colocación y instalación	40%
Soldaduras	15%
Imprevistos no valorables	5%

Algunos de los casos prácticos realizados en diversas instalaciones se basan en el sistema Bolzano'90, el cual incorpora una serie de materiales y dispositivos de control, propios de un depósito de

seguridad para residuos tóxicos y peligrosos. No imperan en este sistema los criterios económicos y la lámina de PEAD elegida tiene un espesor mínimo de 2 mm. Para infraestructuras que han de albergar residuos no peligrosos, la estratigrafía utilizada estará formada por lámina de PEAD de espesor mínimo de 1,5 mm. Por último los depósitos de residuos inertes pueden o no conformar la impermeabilización del vaso de vertido a partir de láminas de PEAD, con un espesor inferior a 1,5 mm.

8.1.3. Aplicación de geosintéticos a obras públicas

Según la *Internacional Geosinthetics Society*, se denomina geosintético al material fabricado con polímeros (mayormente polipropileno, poliéster, polietileno) y que se emplea para mejorar, aumentar y hacer más económicos diversos tipos de proyectos tales como los medioambientales, infraestructuras de transporte, obras geotécnicas, hidráulicas, carreteras, etc.

Se pueden distinguir los siguientes tipos de geosintéticos:

a) *Geotextiles:* Se trata de un material plano, permeable, polimérico (sintético o natural) que puede ser no tejido, tricotado o tejido empleado en ingeniería civil en contacto con los suelos como con otros materiales para aplicaciones geotécnicas. Los geotextiles no tejidos pueden tener sus fibras ligadas mecánicamente, térmicamente o químicamente (con resinas). Las funciones principales son:
   1. *Separación:* impide la contaminación de los agregados seleccionados en el suelo natural.
   2. *Refuerzo:* absorbe los esfuerzos mecánicos que el suelo no posee.
   3. *Filtración:* permite el paso de agua a través de sus poros, impidiendo el paso de partículas finas.
   4. *Drenaje planar:* drena el agua en el plano del geotextil.
   5. *Barrera impermeable:* los geotéxtiles no tejidos, al impregnarse con asfalto u otro tipo de mezclas poliméricas, crean una barrera impermeable contra líquidos.
   6. *Protección:* absorben los esfuerzos inducidos por objetos angulosos o punzantes protegiendo materiales laminares.

b) *Geomallas:* es una estructura de forma plana a base de polímeros química y biológicamente inertes, resistentes a procesos degenerativos de los suelos que tiene sus elementos conectados por extrusión, soldadura o tejido y cuyas aberturas son generalmete mayores que los componentes del suelo natural. Las funciones principales son de refuerzo y estabilización superficial. Pueden ser unidireccionales (proceso de extrusión siguiendo un estiramiento en un solo sentido que ofrece mayor resistencia a la tensión); y bidireccionales (proceso de extrusión siguiendo un estiramiento longitudinal y transversal ofreciendo resistencia en ambos sentidos).

c) *Georredes:* estructura de dos y tres dimensiones de capas y filamentos paralelos entretejidos que crean canales de gran capacidad de flujo y drenaje. Se construyen por extrusión de polietileno de alta densidad (HDPE) y son resistentes a agentes químicos y biológicos. Las georredes sustituyen a los materiales naturales como arena y grava mejorando la estabilidad de taludes laterales, evitando daño a las geomembranas y dando consistencia en la calidad y espesores de los rellenos.

d) *Geomembranas:* son láminas de impermeabilización que evitan el paso del agua empleadas principalmente en túneles, vertederos, depósitos, almacenamientos de agua o cubiertas planas de edificación. Están fabricadas por diferentes tipos de resinas: caucho sintético, polipropileno, clorosulfunado, cloruro de polivinilo, polietileno de alta, media y baja densidad.

e) *Geoesteras:* también llamadas geomatrices o mantas se emplean principalmente para el control de la erosión. Son elementos bi o tridimensionales que permiten el crecimiento de material vegetal en su seno.

f) *Geocélulas:* formada por una serie de tiras de polietileno de alta densidad unidas entre si conformando secciones extremadamente fuertes y creando estructuras celulares o de nido de abeja al expandirse, siendo capaz de soportar las presiones originadas por la erosión y de una estabilidad suficiente para evitar desprendimientos. Su aplicación principal es la protección de taludes y muros de contención, y el asentamiento de márgenes de ríos y canales.

g) *Geocompuestos:* buscan combinar las mejores propiedades de diferentes materiales de forma

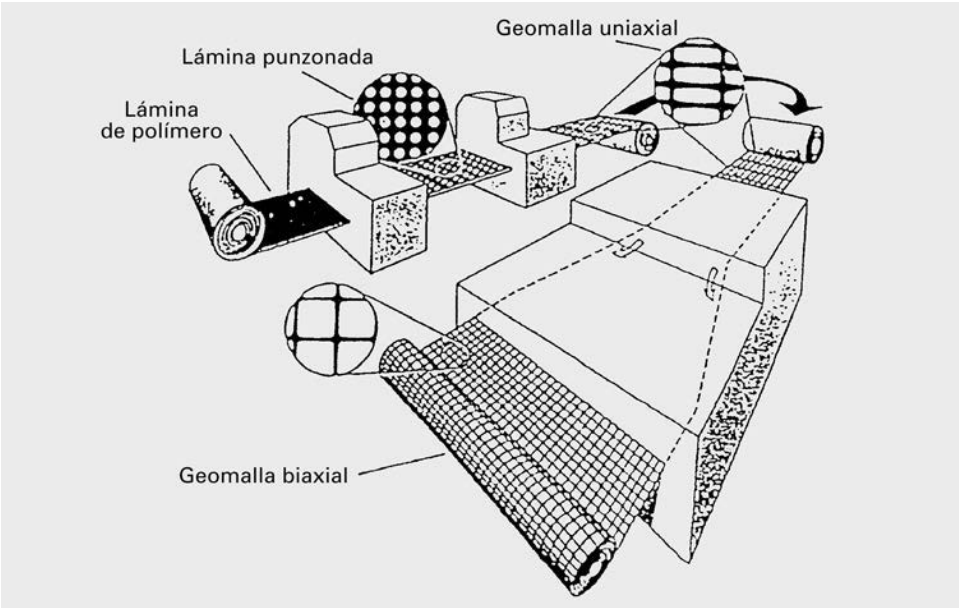


Figura 14.64. Aplicación de geomallas.

que se resuelva un determinado problema, a partir de una combinación de materiales sintéticos y naturales. Sus principales funciones son: *separación, refuerzo, filtración, drenaje* y *contención,* siendo habitualmente una combinación de dos o más de éstas.

Básicamente la capa geotextil se usa, en los vertederos, para minimizar la mezcla de las capas del suelo con las capas de arena o grava. Por lo general, debajo del geotextil se coloca una malla de plástico con tejido abierto (geomalla) e inmediatamente, por debajo de la geomembrana.

De hecho el geotextil y la geomembrana deben actuar juntos como una sola capa que conduce el lixiviado hacia el sistema de recogida de lixiviados. Las geomembranas, que se hallan fabricadas en diferentes materiales, suelen estar impregnadas de una arcilla montmorillonítica (bentonita) que, en contacto con el agua se hincha y, al aumentar de volumen el conjunto se torna impermeable, evitando que los lixiviados puedan filtrarse en el terreno.

La Figura 14.64 muestra diferentes geometrías de geomallas, mientras que la Figura 14.65 esquematiza uno de los sistemas de aplicación del conjunto al caso de unas cubetas de vertedero.

8.1.4. Revegetación e impermeabilización de taludes

En ocasiones un talud, a parte de presentar una estabilidad mecánica muy precaria, está constituido por un residuo suficientemente tóxico como para impedir que la vegetación prospere. En esta tesitura es preciso aislar el material que compone el talud por medio de un elemento de contención.

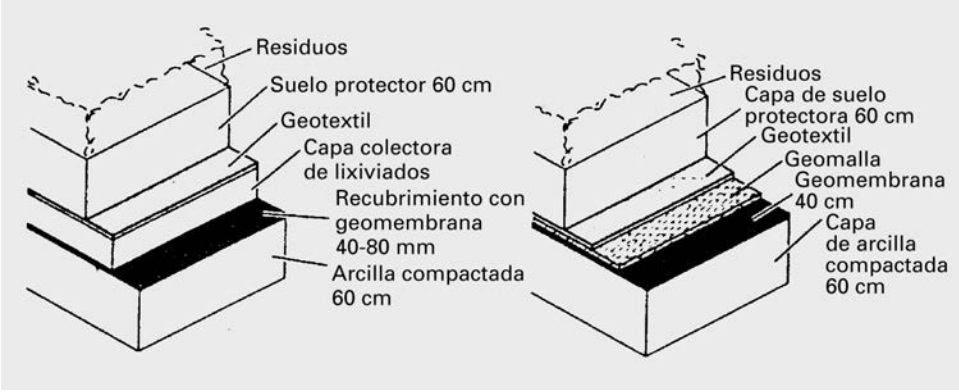


Figura 14.65. Aplicación de geotextiles a cubetas.

Para ello se excavan unas pequeñas terrazas en el talud donde se coloca una lámina de polietileno de alta densidad. Seguidamente se deposita el geotextil para reforzar la impermeabilización.

Más tarde se coloca una capa de material drenante y finalmente la capa vegetal con la correspondiente hidrosiembra para favorecer que la vegetación crezca lo más rápidamente posible con el fin de estabilizar el talud, tal y como muestra la Figura 14.66.

8.2. EL VERTIDO DE RESIDUOS VISTO DESDE EL PUNTO DE VISTA DE LOS POSIBLES SUELOS CONTAMINADOS

Aunque por naturaleza de la temática en este apartado sólo se comentarán aspectos relacionados con los vertederos de superficie, debido a la importancia del tema es conveniente llevar a cabo una sucinta exposición de los diversos sistemas de deposición que existen.

8.2.1. Vertederos de superficie

Son aquellas instalaciones en que el depósito se realiza a cielo abierto. Debido a la propia concepción es preciso clasificarlos de acuerdo con la naturaleza de los residuos que contendrán:

- Depósitos controlados de clase I: sólo admitirán residuos inertes.
- Depósitos controlados de clase II: sólo contendrán residuos no especiales. O sea, aquellos en que el residuo no es tóxico pero sí lo pueden ser los productos de su fermentación, descomposición, transformación y/o lixiviación.
- Depósitos controlados de clase III: destinados al confinamiento de los residuos tóxicos y peligrosos.

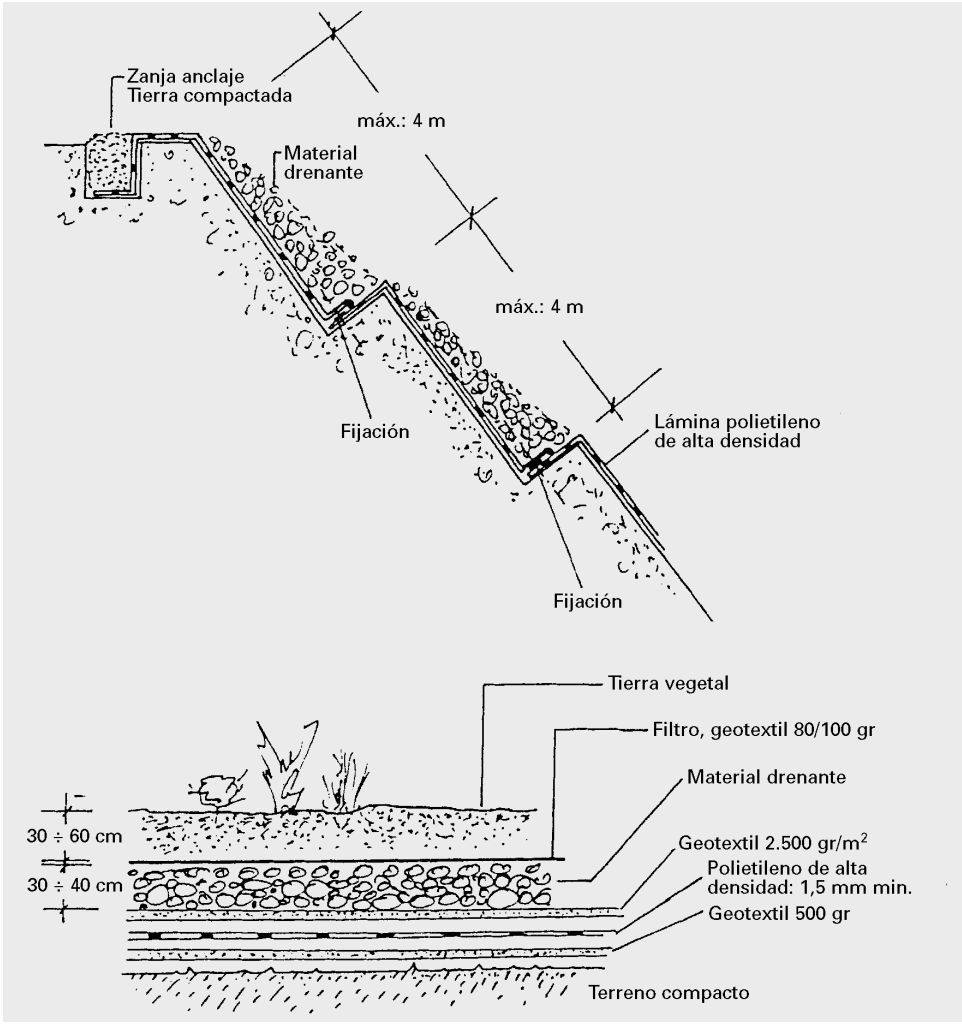


Figura 14.66. Revegetación de taludes.

8.2.2. Depósitos subterráneos

En la actualidad son considerados como una de las mejores opciones para el confinamiento de los residuos tóxicos y peligrosos no valorizables, en particular aquellos cuyo coste de destrucción es, hoy en día, muy elevado. Las particularidades más importantes que deben cumplir los residuos a depositar son:

- Ni ser autoinflamables ni explosivos. Ni ellos ni sus emanaciones.
- Ser sólidos y químicamente estables. Poco corrosivos.
- No deben aumentar de volumen con el tiempo.
- No pueden ser radioactivos.

Las rocas salinas son los lugares más usados y estudiados para este fin, seguido de las formaciones plutónicas y las rocas sedimentarias.

Históricamente, los vertederos han representado la forma más económica y ambientalmente más aceptada para la evacuación de los residuos. Con el tiempo ha sido preciso introducir diversas limitaciones en los vertederos, que pueden resumirse en:

- Respecto al producto sólo se procesan residuos sólidos, aunque algunos admiten semisólidos con humedades máximas del 65%. No se admiten residuos especiales, o solo se los admite si han sido previamente tratados.
- Respecto al diseño y funcionamiento del vertedero alto grado de impermeabilidad, tratamiento de lixiviados, estudios hidrogeológicos, minuciosa regulación de la explotación.
- Respecto a la política de tratamiento de residuos La oposición popular es cada día más fuerte hacia nuevos proyectos, los residuos vertidos no tienen ninguna posibilidad de ser reciclados, el impacto medioambiental de los vertederos es superior al previsto hace años. Por todo ello las administraciones son cada vez más reacias a la concesión de licencias para la abertura de vertederos.

Si a todos estos factores se añade la expansión demográfica, el incremento en la generación de residuos, la búsqueda de un lugar adecuado (normalmente lejos de los centros de producción de los residuos), etc., se comprende que el futuro de los vertederos como sistema de tratamiento de residuos, tenga un futuro muy cuestionado.

8.2.3. Preparación de la zona de vertido

Una de las tareas más difíciles que debe abordar una comunidad es la elección de la localización de un nuevo vertedero. Los factores esenciales que deben considerarse son:

- *Condiciones geológicas e hidrogeológicas:* Por medio de catas y sondeos debe estudiarse el subsuelo para valorar la contaminación potencial que ocasionara el vertedero.
- *Hidrología de aguas superficiales:* Es importante para determinar las características de drenaje natural, de escorrentía y de inundación.
- *Condiciones del suelo y topografía:* Ello hace referencia a las características del terreno para poder extraer de él las capas de arcilla para la cubrición.
- *Clima local:* Un clima muy severo impide la extracción de arcilla para la cubrición. Un clima muy ventoso puede transportar polvo y partículas, al margen, claro está, de olores.
- *Condiciones de acceso:* El alejamiento paulatino de los vertederos de las vías de comunicación provoca problemas de logística a los que hay que sumar el hecho del incremento de tráfico que ocasionan el tamaño cada vez mayor de los vertederos.
- *Disponibilidad de terreno:* Es preciso asegurar una reserva de terreno suficiente para, al menos 5 años y prever contingencias de desviación en las previsiones iniciales.
- *Condicionantes de vecindad:* Hay que valorar los aspectos que van a ser medioambientalmente aceptables por la proximidad de polígonos industriales y zonas residenciales como: Tráfico, ruido, olores, polvo, residuos volantes, impacto visual, posibles afecciones a la salud,...
- *Restricciones de ubicación:* En algunos países hay severas restricciones con respecto a la localización de vertederos en zonas próximas a: Aeropuertos, terrenos de aluvión, zonas húmedas, zonas con fallas conocidas o parajes de actividad sísmica.

8.2.4. Requerimientos para un correcto vertido

El criterio de vertido debería circunscribirse a la gestión de residuos para los que no existan otras posibi-

lidades de tratamiento seguro, ni obviamente, de valorización, como por ejemplo:

- *Tóxicos,* de difícil combustión o no incinerables, o susceptibles de generar gases y/o cenizas tóxicas procedentes de la combustión, de complicado tratamiento.
- *Peligrosos,* sin posibilidades efectivas de someterlos a tratamientos fisicoquímicos, o que sean extremadamente onerosos.
- *Especiales* cuyo producto final pueda resultar más tóxico que el residuo de partida.
- *Residuos* producidos en pequeñas cantidades, o que no sean no aptos para mezclar con otros residuos para efectuar un tratamiento conjunto.

En cualquier caso, los principales requerimientos que deben exigirse a la cubeta del vertedero son:

- Exigencia de un alto grado de impermeabilidad (coeficiente $k_s<10^{-9}$ m/s, que según la ley de Darcy, se corresponde a una capa, generalmente de arcilla, con un espesor de 10 m).
- Minuciosa regulación de explotación en particular en lo que hace referencia a la admisión de residuos y control de lixiviados, gases, plagas, incendios, plan de emergencias, etc.
- Conocimiento exacto de la localización de cada residuo, así como de sus sucesivas partidas.

La Figura 14.67 muestra la sección esquemática de un vertedero.

8.2.5. La estabilidad en depósitos de residuos sólidos urbanos

El concepto de estabilidad debe estar relacionado con los de seguridad y de permanencia. Es decir, para los aspectos concretos de la estabilidad mecánica de la masa de los vertidos así como para la continuidad de la superficie de sellado o de finalización de la explotación. Así, si se considera un depósito, como un volumen de materia artificial ubicado en un área del territorio, la estabilidad va unida a la del terreno confinante y a la del propio material depositado. También debe contemplarse la estabilidad de la morfología superficial bajo las condiciones climáticas locales, una vez finalizada la explotación. Se distinguen tres tipos de estabilidad.

- Estabilidad del terreno encajante.
- Estabilidad de la masa vertida.
- Estabilidad de la cobertera.

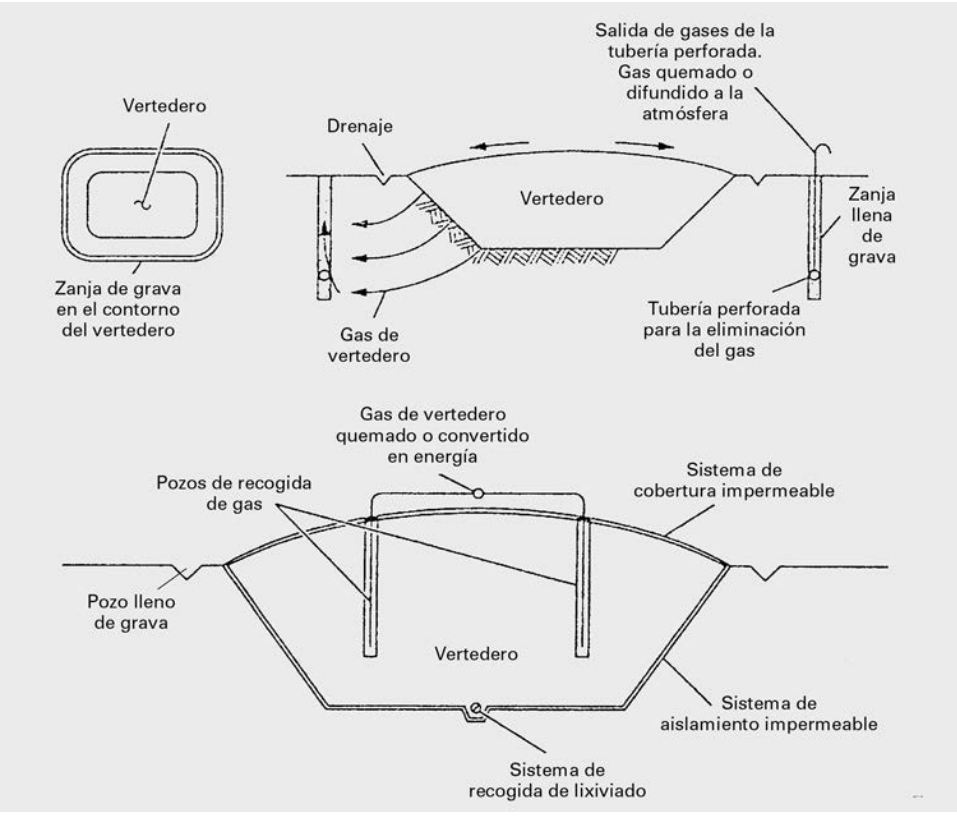


Figura 14.67. Sección de un vertedero.

a) *Estabilidad del terreno encajante*

Los terrenos apropiados para ubicar depósitos de residuos se valoran como muy adecuados aquellos que son arcillosos, debido a su baja conductividad hidráulica. Este tipo de terreno se caracteriza por tener cohesiones muy bajas o prácticamente nulas y un descenso en el ángulo de rozamiento interno, si el terreno está saturado, o se va saturando mientras dura la explotación, puede ocasionar determinadas situaciones de inestabilidad en el depósito, independientemente de la masa de vertidos.

b) *Estabilidad de la masa vertida*

Si se supone que el terreno que soporta el depósito es estable en cualquier situación, se ha de contemplar la estabilidad del depósito en sí, o la estabilidad del volumen del material artificial de vertido de residuos sólidos urbanos. Esto no quiere decir que los materiales así denominados sean homogéneos, pero tal denominación conlleva, dentro de la heterogeneidad, unos ciertos comportamientos paralelos, como pueden ser la compactación que admiten y los procesos fisicoquímicos y biológicos que les afectan. Al abordar la estabilidad de los vertidos mediante métodos usuales de mecánica de suelos, se plantean problemas derivados de la heterogeneidad de los materiales y muy específicamente de las grandes diferencias de tamaño de grano de sus componentes. Por eso los resultados a partir de métodos tradicionales no resultan satisfactorios y no explican que se produzcan, durante la explotación, altos taludes con fuerte pendiente formados por estos residuos.

El Instituto *Deustche Forschubgsgemeinschft* ha aplicado una metodología que permite tener en cuenta gran parte de la heterogeneidades de los residuos sólidos urbanos y obtener valores representativos de sus parámetros mecánicos, que explican las observaciones de campo aludidas en el párrafo anterior. Esto ha permitido establecer modelos de comportamiento que tienen en cuenta la abundante proporción de componentes de gran tamaño que presentan los residuos. De este modo, estos componentes que por otro lado, acostumbran a ser los más resistentes a la acción bacteriana, como los plásticos, actúan a modo de fibras resistentes por su cohesión propia, pero además añaden una resistencia muy notable por un efecto de atirantamiento al estar confinadas las fibras entre otros materiales. Este efecto aumenta con la acción normal, parecido a la resistencia por rozamiento interno.

Cabe destacar que en aquellos depósitos en los cuales se vierten los residuos previamente seleccionados, el atirantamiento de las fibras plásticas desaparece.

c) *Estabilidad de la cobertera*

La cobertera final tiene que cumplir diversas funciones relacionadas con la estabilidad. Esto se intenta conseguir mediante el sellado del depósito, el cual consiste en aislar la masa vertida del entorno. El sellado debe impedir, básicamente, la infiltración hacia el interior del agua de lluvia. Por tanto debe desviar estas aguas en forma de escorrentía superficial, sin que se produzcan encharcamientos, ni retenciones de agua, ni canales, ni surcos, y todo ello recubriendo un medio sometido a asentamientos diferenciales en el tiempo y asociados a probables deformaciones de la morfología exterior.

En definitiva, la estabilidad y la continuidad de la cobertera puede verse comprometida por causas externas o internas propias del depósito, y que probablemente afectarán a la estabilidad del conjunto del depósito.

8.2.6. Evaluación y minimización del impacto ambiental de los vertederos de residuos sólidos sobre el medio hidrogeológico y geoquímico

La construcción de depósitos, como sistema de gestión de residuos sólidos urbanos (RSU) puede ocasionar numerosos impactos negativos sobre el medio ambiente. Pudiendo afectar a la atmósfera, los suelos, los cursos de aguas superficiales y las subterráneas, así como a las actividades socioeconómicas circundantes; todos ellos pueden verse afectados por la ubicación del depósito.

En los últimos 30 años, se ha contabilizado la existencia de más de 2.000 acuíferos contaminados por vertederos de RSU en los países del mundo occidental y, al menos, 10.000 unidades hidrogeológicas están gravemente afectadas por la deficiente gestión de un vertedero de RSU.

Los mecanismos que conducen a la polución de las aguas subterráneas se basa fundamentalmente en la infiltración de soluciones extraídas de los RSU con contenidos variables de contaminantes (lixiviados).

Las reacciones que implican el medio gaseoso tienen una importancia considerable, puesto que, a la larga, al menos el 50% del volumen total de los RSU

está constituido por las fases volátiles del mismo. La mayoría de los compuestos gaseosos que se generan tienen su origen en las reacciones de fermentación anaerobia y aerobia del mismo, las cuales a su vez controlarán el pH de los lixiviados así como la riqueza energética del biogás formado. La presencia de ciertos componentes tóxicos y peligrosos, así como de sustancias orgánicas halogenadas, suponen la emisión de compuestos orgánicos volátiles de elevada toxicidad.

El conocimiento del medio hídrico, y muy especialmente del balance de agua del vertedero es básico para evaluar la magnitud de los lixiviados a tratar. La suma de los residuos, los gases generados y el agua infiltrada producen el medio en el que se desarrolla una gran actividad química y que tiene su detonante en la degradación óxica y anóxica de la materia orgánica más fácilmente fermentable que desencadena una cascada de reacciones químicas.

La presencia de lixiviados provoca un impacto sobre el medio hidrogeológico subyacente. Impacto formado por las alteraciones hidráulicas y afección en la calidad de las aguas subterráneas y superficiales. La formación de los lixiviados y su percolación hacia los sustratos geológicos inferiores, es el proceso básico que conforma la afectación de las aguas subterráneas. Es importante decir que si el nivel freático se encuentra suficientemente profundo, los lixiviados han de recorrer una zona no saturada, si además ésta está formada por granos finos y presenta un complejo de cambio desarrollado, puede absorber cationes metálicos y retardar la contaminación de los acuíferos interiores por tóxicos.

Sin embargo el concepto de procesos biogeoquímicos que tienen lugar en la zona saturada son los más importantes a la hora de considerar la interacción lixiviado/medio hidrogeológico. La contaminación del acuífero adopta la forma de un penacho, condicionado por la geometría de los materiales geológicos y por la dirección del flujo. Es frecuente la precipitación de determinadas fases minerales que llegan a condiciones de saturación en el medio hidrogeológico, mientras que es posible también la disolución de determinados minerales de la materia sólida del acuífero debido a la interacción con los lixiviados. Se producen, además, fenómenos de cambio iónico, reacciones de oxidorreducción, difusión y dispersión entre otros.

A modo de ejemplo, se ha tomado en consideración algunos aspectos que se producen como afectaciones o impactos ambientales negativo de un vertedero de RSU sobre el medio hidrogeológico y geoquímico, que se puede sintetizar en la composición y producción de lixiviados en dos casos estudiados diferenciados, pero con unos denominadores comunes: Superficie 40 ha, 20 años de existencia y 2.000.000 t de RSU depositados. Las situaciones particulares de ambos casos se describen a continuación.

- *Caso I:* Climatología lluviosa (mayor de 1.000 l/m^2 año), inadecuadas prácticas en superficie y fermentación inadecuada de la materia orgánica.
- *Caso II:* Climatología seca (menor de 400 l/m^2 año), adecuadas prácticas de deposición en superficie y evacuación del biogás en condiciones óptimas.

En la Tabla 14.30 se reflejan los parámetros que cabe esperar para cada una de las situaciones estudiadas.

Tabla 14.30. Parámetros de los lixiviados

Parámetros	Caso I	Caso II
DBO_5	5.000 mg O_2/l	500 mg O_2/l
Conductividad	30.000 mS/cm^2	< 5.000 mScm^2
Cl–	10.000 ppm	< 500 mg/l
Pb	2 ppm	< 0,1 ppm
Hg	0,05 ppm	< 1,0 ppb
Cr (VI)	100 ppm	< 0,1 ppm
Fenoles	10 ppm	< 1,0 ppb
Lixiviados (*)	100.000 m^3/año	4.000 m^3/año

* Estos valores son orientativos

8.3. SUELOS CONTAMINADOS: POSIBILIDADES DE VALORIZACIÓN

Los suelos contaminados químicamente vienen significando, desde los años setenta del siglo XX, un problema sanitario y ambiental con importantes repercusiones económicas. El impacto ejercido durante años por diversas actividades extractivas, industriales y agrícolas sobre la calidad de los suelos es incuestionable y difícil de borrar.

El número de emplazamientos declarados contaminados y el volumen de suelo afectado no han cesado de aumentar, lo mismo que los recursos destinados a la recuperación de suelos contaminados.

En el territorio de la Unión Europea, y según fuentes de la Comisión, los gastos, tanto públicos

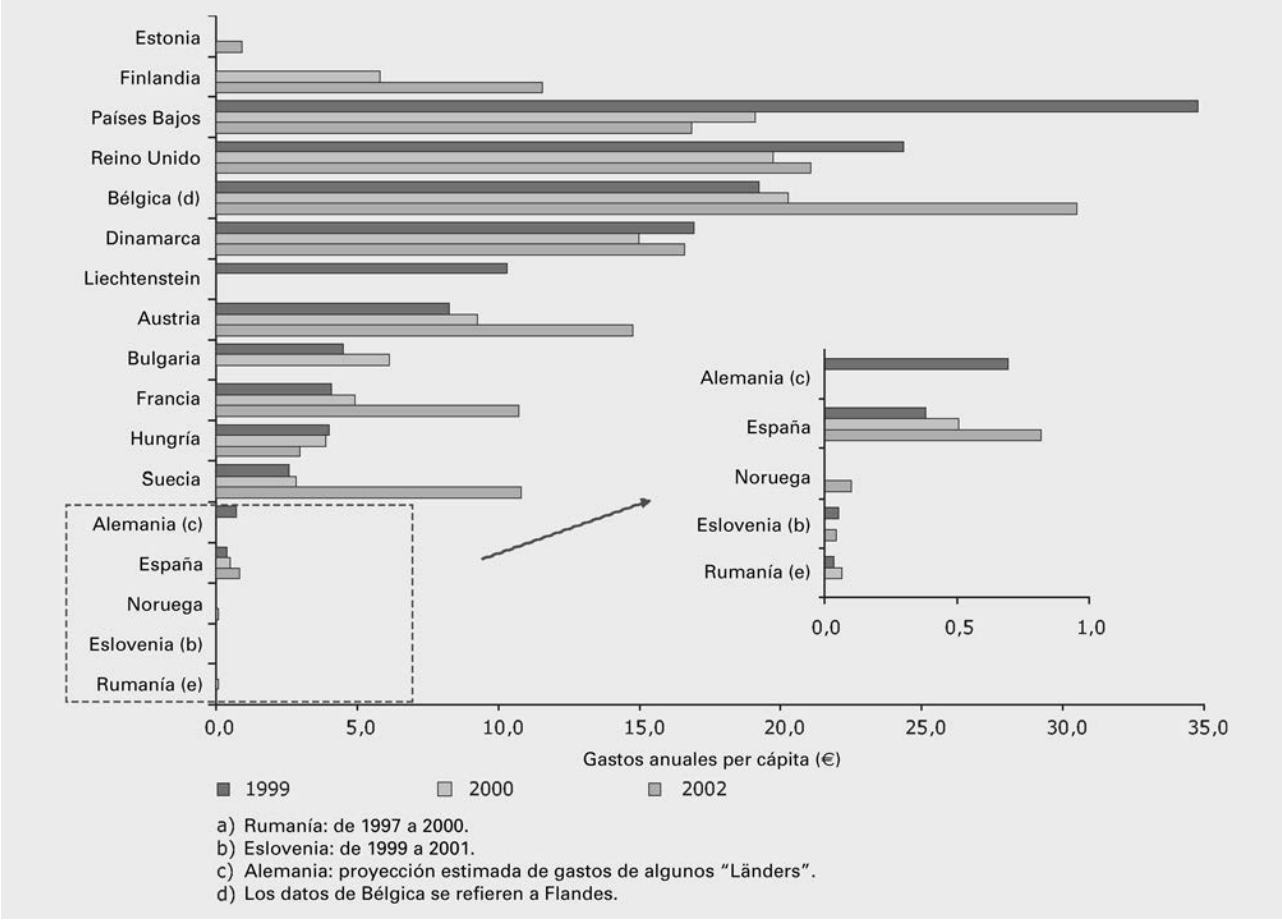


Figura 14.68. Costes anuales del saneamiento de suelos contaminados en Europa (Fuente: AEMA, 2005).

como privados, atendidos hasta ahora suponen únicamente alrededor del 8% del total de los costos previsibles a la luz de los inventarios de suelos contaminados de que se dispone. A pesar de que muchos países disponen de instrumentos legislativos que aplican el principio «quien contamina, paga» en los casos de contaminación de suelos, se calcula que hasta un 25%, en promedio, de los costos totales de saneamiento cubiertos hasta ahora, han sido sufragados con dinero público.

Las inversiones anuales en el capítulo de la descontaminación varían de un país a otro, estando comprendidas, como indica la Figura 14.68, entre 2 y 35 Euro *per capita* en los países analizados en el periodo 1999-2002 (AEMA, 2005).

Desde hace unas décadas, las necesidades de suelo en las áreas urbanas del planeta, y en las del continente europeo particularmente, han provocado un aumento espectacular de la superficie construida como muestra la Figura 14.69, que se ha ido extendiendo a un ritmo más rápido que la población.

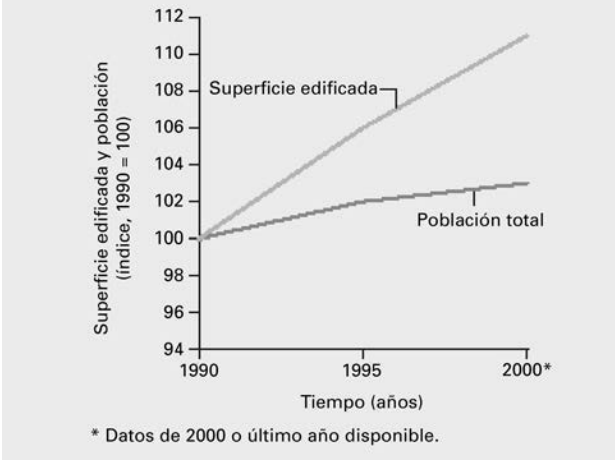


Figura 14.69. Incremento de la superficie construida y de la población en Europa (Fuente: EMA, 2004).

En los países extensos, la mayoría de las nuevas áreas urbanas han sido creadas a costa de suelos naturales, dedicados tradicionalmente al uso agrícola y forestal, que mostraban, en general, buenos índices

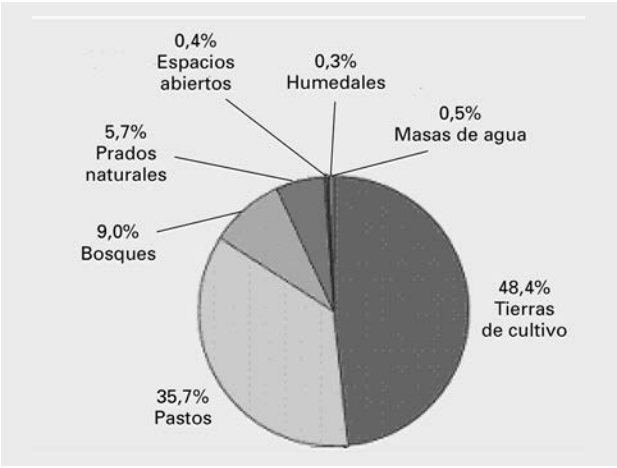


Figura 14.70. Origen del suelo transformado en urbano en Europa. (Fuente: AEMA, 2004).

de calidad. Esta situación queda reflejada en la Figura 14.70.

El fenómeno es prácticamente universal pero es más preocupante en Europa, a causa de las elevadas tasas de población y ocupación del espacio.

El fenómeno, que conduce al denominado sellado del suelo, constituye un grave problema, en el ámbito urbano y periurbano, al implicar la pérdida del suelo bajo las construcciones, las instalaciones industriales y las infraestructuras, limitándose en la práctica otros posibles usos del suelo para las generaciones futuras.

El sellado significa una limitación de la entrada de agua, nutrientes u oxígeno al sistema, con lo que se dificultan, e incluso paralizan, los procesos naturales que tienen lugar en el suelo. Las áreas selladas pueden tener un gran impacto sobre los suelos adyacentes, al modificar la circulación del agua y contribuir a incrementar la pérdida de la biodiversidad, hasta el punto de poner en peligro los ecosistemas, debido sobre todo a la destrucción de los hábitats o a la extinción de determinadas especies El sellado del suelo tiene consecuencias prácticamente irreversibles.

Esta práctica resulta contraindicada con el principio de uso sostenible de los recursos naturales, y especialmente de los recursos no renovables a la escala humana de tiempo, entre los cuales se halla el suelo.

La cuantificación del fenómeno no es fácil, dado que los datos disponibles sobre la extensión de las áreas construidas son escasos, y corresponden a un reducido número de países, que emplean metodologías de evaluación distintas, por lo que tampoco pueden ser comparados.

Ya en la década de los 70 del siglo pasado, el desarrollo urbano tuvo como consecuencia la pérdida de suelos potencialmente productivos a un ritmo cercano a las 120 ha/día en Alemania y las 35 ha/día en Austria. Actualmente, el ritmo de sellado alcanza un valor de 122 ha/día en Alemania, 72 ha/día en Francia, 18 ha/día en Bélgica y 9 ha/día en Holanda; en Andalucía este valor es de 14,4 ha/día.

Analizando la situación en España, en el periodo 1987-2000, se han producido cambios muy importantes y rápidos en el territorio, según los datos del Instituto Geográfico Nacional, recogidos en un informe del Observatorio de la Sostenibilidad de 2006. Los cambios más significativos han sido, el sellado de los suelos, tanto en el interior como en la franja litoral; el aumento de los regadíos a partir de zonas de secano y, en muchos casos, de zonas con escasez de recursos hídricos; y las importantes transformaciones internas en los sistemas forestales, a causa de los incendios y de nuevas reforestaciones.

La superficie construida en España representa, en estos momentos, un 2,1% del territorio, habiéndose incrementado un 29,5% en el periodo 1987-2000, lo que supone un ritmo de crecimiento de 2 ha/hora. Es decir, cada hora se sella en España una superficie de suelo equivalente a dos campos de fútbol. España es uno de los países del continente europeo donde más ha crecido la superficie artificial. Con un ritmo medio anual de 1,9%, muy por encima de la media de los países del programa CLC (*Corine Land Cover*) 2000, que es de sólo un 0,68%.

Las zonas agrícolas ocupan un 49,8% de la superficie y registran cambios en el sentido de un incremento de las producciones intensivas orientadas a una mayor rentabilidad de mercado, aunque muy dependientes del regadío.

Las zonas forestales y espacios abiertos que ocupan un 47,1% del territorio, presentan en conjunto, una tendencia a la estabilización o una ligera disminución. Sin embargo, en esta línea se han producido profundas transformaciones. Por un lado, la superficie ha disminuido a causa de los incendios forestales y del crecimiento de zonas urbanas e industriales, pero por otro se ha visto incrementada por el abandono agrario y las reforestaciones, que han originado una matorralización de los ecosistemas.

Las zonas húmedas y superficies de agua representan casi el 1% de la superficie en España. En el periodo 1987/2000, se produjo una disminución de las zonas húmedas naturales (3%) y un incremento (19%) de las artificiales (embalses, salinas y canales

artificiales).

Según datos de la Junta de Andalucía (región del sur de España), las superficies construidas y alteradas aumentaron en su territorio un 14,5% entre 1991 y 1999, aunque aquí hay que destacar el hecho de que el sector que más superficies naturales y forestales transformó fue el de los cultivos de secano.

En Cataluña, según datos del *Departament de Política Territorial i Obres Públiques de la Generalitat*, en solo dos años, del 2002 al 2004, la superficie de suelo urbano se ha incrementado en un 1,4% y la superficie de suelo urbanizable lo ha hecho en un 2,7%. Las previsiones para el futuro inmediato no dejan lugar al optimismo.

Una moderada disminución del suelo disponible es inevitable pero, si el suelo afectado por el sellado desempeña un papel importante, por ejemplo, en la producción alimentaria, la conservación de la naturaleza, el control de inundaciones o cualquier otra función vital, las consecuencias sobre el desarrollo sostenible son innegables.

Existen, como muestra la Figura 14.71, tres elementos implícitos en el concepto sostenibilidad: la dimensión económica, la social y la ecológica (). La gestión sostenible del suelo puede significar distintas cosas, según la función del suelo que interesa preservar o el momento histórico en que se hace.

En los países pequeños y/o en los superpoblados,

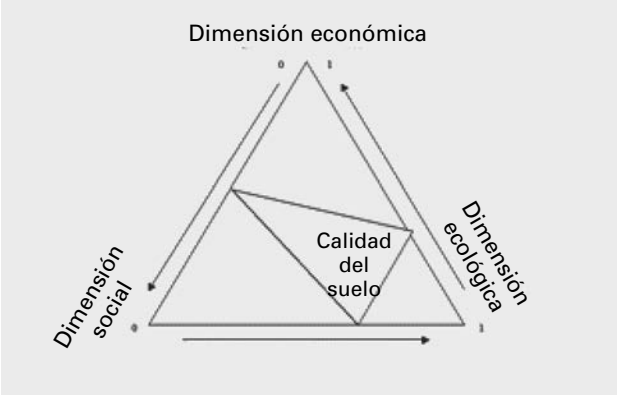


Figura 14.71. Triángulo Moebius para las tres dimensiones implícitas en el concepto sostenibilidad. (Hünnemeyer *et al.* 1997).

donde la falta de suelo disponible resulta acuciante, las reutilizaciones de suelo industrial en forma de suelo urbano se han venido produciendo y consintiendo sin demasiadas limitaciones, hasta hace unos pocos años.

Las ruinas y los antiguos solares industriales abandonados constituyen una oportunidad de desarrollo y de negocio de gran valor; sin embargo, dicha oportunidad no debe ocultar la necesidad de que la nueva puesta en mercado de los correspondientes suelos se realice de forma segura, tanto para la salud de las personas como para el buen funcionamiento de los ecosistemas; es más, se pueden y se deben aprovechar las plusvalías que se van a generar para llevar a cabo las operaciones necesarias de saneamiento de los suelos y de las aguas subterráneas y restauración de los ecosistemas.

La mayor parte de aquellos pasivos se hallan en zonas urbanas, zonas que desempeñan un importante papel en el cumplimiento de los objetivos de la Estrategia de la Unión Europea para un desarrollo sostenible. La estrategia temática de la UE para la protección del suelo, en curso de preparación, tratará, con toda probabilidad, la rehabilitación y reutilización de las zonas industriales abandonadas, así como la planificación del ahorro de espacio, con el fin de aminorar el sellado de suelos y asegurar un uso racional del recurso.

Un plan de incentivos para fomentar iniciativas, públicas o privadas, que opten por la reutilización de terrenos abandonados se hace completamente necesario. Iniciativas de esta naturaleza contribuyen a resolver dos tipos de problemas: la falta de suelo disponible y la carencia de recursos para el saneamiento de los suelos contaminados en el pasado.

Las contaminaciones históricas suponen una verdadera sangría para las Administraciones Públicas, que son las que deben correr con los gastos del saneamiento en la mayoría de ocasiones.

Las vigentes disposiciones ambientales de la Unión Europea, entre ellas la Directiva sobre prevención y control integrado de la contaminación y la Directiva sobre Vertederos, deberían conseguir la disminución del número de «nuevos» emplazamientos contaminados, de la misma forma que las correspondientes normativas estatales.

En España, con la entrada en vigor del Real Decreto 9/2005, por el que se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados, la gestión de los suelos contaminados cobra un nuevo impulso.

Son muy variados los posibles escenarios de aplicación de dicha norma, pero sin duda, uno de los sectores de actividad más directamente afectado por ella va a ser el de la construcción, ya que no es infrecuente que se acometan proyectos en suelos po-

tencialmente contaminados.

Los suelos potencialmente contaminados son, según el Real Decreto, aquellos en los que:

- Se realizan actualmente actividades que figuran en el anejo de actividades potencialmente contaminantes del suelo del citado Real Decreto.
- Se han realizado en el pasado actividades potencialmente contaminantes.
- Se producen, manejan o almacenan más de 10 toneladas por año de una o varias sustancias tipificadas como explosivas, comburentes, extremadamente inflamables, fácilmente inflamables, inflamables, muy tóxicas, tóxicas, nocivas, corrosivas, irritantes, sensibilizantes, carcinogénicas, mutagénicas, tóxicas para la reproducción o peligrosas para el medio ambiente.
- Se almacenan combustibles para uso propio con un consumo anual medio superior a 300.000 litros y con un volumen total de almacenamiento igual o superior a 50.000 litros.

La existencia de suelos potencialmente contaminados incide en los costes, en los procedimientos a seguir y en los plazos o tiempos de espera de las obras proyectadas. Todos los estudios necesarios para obtener un certificado de calidad del suelo deben contabilizarse en el propio proyecto constructivo.

Resulta por tanto imprescindible conocer los procedimientos a seguir, en el caso de utilizar un emplazamiento potencialmente contaminado, máxime si debe procederse a su descontaminación. Hay que tener en cuenta que la normativa establece que el responsable de tomar las oportunas medidas de recuperación en un suelo contaminado es, en primera instancia, el causante de dicha contaminación, y, en segunda, el propietario del suelo.

El Real Decreto ha contribuido a mejorar la seguridad legal en las transacciones de terrenos, por lo que en este momento se dispone de mecanismos administrativos suficientes para afrontar, con una cierta seguridad, este tipo de operaciones.

8.3.1. Contaminación de origen industrial

La contaminación de origen industrial se inscribe dentro de la llamada *contaminación exógena* que hace referencia a los aportes antrópicos que recibe el suelo, ya sea con carácter puntual o difuso.

Las causas más comunes de la contaminación química de los suelos derivadas de la actividad industrial son:

- La deposición controlada y/o incontrolada de residuos.
- Los vertidos accidentales.
- Las pérdidas y fugas durante el proceso de producción.
- El almacenamiento de materias primas o productos sobre el suelo o en tanques subterráneos.
- El transporte de materias primas, productos acabados o residuos industriales.
- Los accidentes y vertidos de productos durante las operaciones de llenado de tanques y/o de trasvases.
- Las operaciones de carga, descarga (goteos en las uniones entre mangueras, sobrellenado de depósitos).
- La deposición desde la atmósfera de contaminantes emitidos desde emplazamientos industriales.
- Las fugas en las redes de alcantarillado.
- El abandono de industrias obsoletas (*brownfields*).

La USEPA define los *brownfields* como aquellos recursos industriales y comerciales abandonados, o poco utilizados, para los que la expansión o la reconstrucción es complicada debido a una contaminación ambiental verdadera o percibida.

Entre las actividades industriales y comerciales más contaminantes se pueden citar: la industria siderometalúrgica, la industria química y farmacéutica, las refinerías, la industria de productos metálicos, las industrias de la madera, las industrias dedicadas al reciclado de metales, las actividades de desguace de vehículos, las estaciones de servicio, la antigua fabricación de gas, y la industria armamentística.

Aunque son cientos los contaminantes químicos que pueden hallarse en el suelo, los más comunes son metales y metaloides, hidrocarburos y disolventes.

Las fuentes principales de algunos de estos contaminantes son:

- *Hidrocarburos del petróleo* (benceno, tolueno, xileno, alcanos, alquenos, MTBE-éter metil tert-butílico): rotura de tanques de almacenamiento enterrados.
- *Disolventes y agentes de limpieza en seco* (acetona, tricloroetileno, formaldehído y percloroetileno): vertido o fuga de los mismos desde las áreas de almacenamiento.
- *Metales* (zinc, cadmio, plomo, mercurio): de-

pósito del polvo atmosférico proveniente de fundiciones y centrales térmicas.
- *PCBs* (bifenilos policlorados): fugas de los transformadores eléctricos.
- *Plomo:* depósito del polvo atmosférico proveniente de demoliciones.

En la Tabla 14.31 aparecen relacionadas las actividades y los contaminantes.

Cualquier actividad generadora de partículas sedimentables y en suspensión puede ser considerada, en un sentido amplio, como foco potencial de contaminación del suelo debido a la posterior deposición, seca o húmeda, que sufren aquellas.

8.3.2. Contaminación de origen agrícola

La agricultura intensiva es una de las actividades humanas con efectos ponderables sobre la contaminación del suelo debido, tanto al uso de fertilizantes y plaguicidas de forma prolongada como al almacenamiento inadecuado de productos agroquímicos, muchas veces en desuso durante años. No todos los derrames de plaguicidas comportan riesgos para la salud humana o los ecosistemas. Lleva tiempo que la contaminación alcance los niveles necesarios para generar riesgos para la salud.

Algunos de los factores que determinan los riesgos potenciales de tales situaciones son, junto a las características del suelo, son los siguientes:

- Las características de los plaguicidas almacenados: algunos más tóxicos que otros, algunos se degradan rápidamente a formas inocuas, otros son más solubles (ver Tabla 14.32).
- La cantidad de plaguicida derramado y el tiempo durante el que se ha estado produciendo el derrame.

Otros plaguicidas muy utilizados también como:

Tabla 14.31. Actividades industriales y contaminantes potenciales del suelo

Tipo de industria	Contaminantes del suelo
Acumuladores/baterías	Plomo, cromo,nNíquel, cadmio, arsénico.
Asfalto/Alquitrán	Fenoles, PAHs, BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xileno), y aceites minerales*.
Astilleros	Disolventes (clorados y otros), PAHs, aceites minerales, cadmio, cobre, cromo, níquel, plomo, zinc, estaño.
Curtidos	Disolventes (clorados y otros), cromo, cobre, cadmio, níquel, arsénico, zinc.
Chatarrerías	Plomo, cobre, cromo, níquel, cadmio, aceites minerales,
Fábricas de gas	Fenoles, PAHs, BTEX, cianuros, sulfuros, arsénico, cromo, zinc, plomo, amianto.
Fabricación de plaguicidas	Disolventes (clorados y otros), arsénico, cobalto, mercurio, cromo, cobre, selenio, plata, zinc, estaño, cianuros, bromuros, fluoruros, mercaptanos.
Fundiciones/Acerías	As, Cd, Cu, Cr, Hg, Ni, Pb, Zn, Mo, cianuros, sulfuros, aceites minerales, fenoles, BTEX, disolventes clorados.
Galvanización	Disolventes, Cr, Cu, Cd, Zn, As, Pb, cianuros.
Gasolineras	Aceite/diesel, BTEX, plomo, MTBE.
Grano y piensos	Cobalto, cobre, mercurio, selenio, zinc, ácido fosfórico, mercaptanos.
Imprenta/Artes gráficas	Disolventes (clorados y otros), plomo, cobre, mercurio, cromo, níquel.
Industria farmacéutica	Disolventes (clorados y otros).
Industria de la madera	Cromo, cobre, níquel, fluoruros, aceites minerales, creosotas, fenoles, plaguicidas.
Industria del plástico	Disolventes, ftalatos, plomo, cadmio, cromo, cobre, zinc, cianuros, sulfuros.
Química de síntesis	Disolventes (clorados y otros), arsénico, cromo.
Pinturas/Lacados	Disolventes (clorados y otros), arsénico, cromo, cobre, cadmio, cobalto, molibdeno, plomo, selenio, zinc, estaño, plata, fosfatos, sulfuros, cianuros, fluoruros, ftalatos.
Refinerías	Aceite/diesel, BTEX, plomo.
Siderurgia pesada	As, Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Hg, cianuros, fluoruros.
Talleres y garajes	Aceite, BTEX, mercurio, cadmio.
Textiles e impregnación	Disolventes (clorados y otros), pentaclorofenol, cromo, cadmio, níquel.
Tintorerías	Disolventes (clorados y otros), aceites minerales.
Tratamiento de superficies	As, Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Hg, Zn, cianuros, fluoruros, aceites minerales, disolventes (clorados y otros).
Vulcanización	Aceites minerales, disolventes (clorados y otros).

* Aceites minerales (fracción pesada de los Hidrocarburos Totales del Petróleo).

Tabla 14.32. Características de los principales plaguicidas utilizados en agricultura (FAO, 2000)

De movilidad elevada	Tóxicos a partir de su degradación
1,2-dibromoetano (DBE)	Carbarilo
Paraquat	Endosulfan
Pentaclorofenol	Malation
2,4,5-T	Mancozeb
Warfarin	Metamidofos Monocrotofos
Muy bioacumulables, tóxicos y persistentes	No se dispone de suficiente información
Clordano	Bifenilos policlorados (BPCs)
DDT	Clordimeform
Dieldrin	Cloruro de mercurio
Dioxinas	Crocidolita (Asbestos)
Furanos	Endrin
Heptacloro	Fluoracetamida
Hexabromobifenil	HCH (isómeros mixtos del)
Hexaclorobenceno (HCB)	Mirex
Hexaclorobifenil	Terfenilos policlorados
Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs)	Toxafeno
Bifenilos polibromados (BPBs)	Tris (2,3-dibromo-1-propil) fosfato

Aldrin, Atrazina, Captafol, Carbofuran, Clorfenvinfos (Birlano), Clorobencilato, Diazinon, Dimetoato, Dinoseb y sus sales, Fenitrotion, Fosfamidon, Paration-metilo, Paration y Propoxur, no manifiestan propiedades y características dominantes en ningún sentido.

El uso de ciertos plaguicidas, especialmente fungicidas, ha contribuido a aumentar los niveles de metales y metaloides (As, Pb, Hg, Cu y Zn) en los suelos. Los fertilizantes fosforados han venido contribuyendo también, con concentraciones variables de Zn, As, Cd y Pb, según sea el origen de la roca fosfórica a partir de la que se han obtenido.

Algunos metales pesados (Zn y Cu) pueden incorporarse así mismo al suelo con estiércoles de animales, debido al uso de algunos compuestos ricos en dichos elementos en las dietas animales. De especial relevancia es el caso del Cu en el purín de cerdo que puede llegar a limitar su utilización. Los metales se encuentran presentes también en diversos productos desinfectantes utilizados en las instalaciones ganaderas.

8.3.4. Breve revisión de los sistemas de tratamiento de suelos contaminados

Puede hablarse de dos tipos de aproximaciones a la problemática de la recuperación de suelos contaminados.

a) *Ingenieril:* utilizada en casos de degradación extrema y cuando otras posibilidades son inviables o extremadamente lentas, o bien cuando se dispone de cuantiosos recursos para la recuperación. Provoca grandes modificaciones en el suelo. Por lo general, conlleva la excavación del suelo, el tratamiento y la deposición controlada del material tratado, si su calidad impide el retorno a la posición inicial del suelo.
b) *Ecológica:* considera los procesos que se desarrollan de forma natural en el suelo para conseguir, a través de ellos, la inmovilización, transformación o degradación de los contaminantes. Implica una o varias de las siguientes acciones: la estabilización previa del terreno para prevenir la erosión que puedan causar las operaciones de descontaminación, el encalado en el caso de suelos ácidos y la adición de materia orgánica.

Los métodos utilizados actualmente en la recuperación de suelos contaminados se incluyen entre los siguientes grupos:

- *Tratamientos físicos:* Lavado, extracción de vapor, solidificación-estabilización, vitrificación, incineración, atenuación natural.
- *Tratamientos químicos:* Degradación química, deshalogenación, extracción, electrocinética, atenuación natural.
- *Tratamientos biológicos:* Degradación microbiana, fitorremediación, atenuación natural.

En función de cómo y dónde se apliquen, estas técnicas de saneamiento se clasifican en:

- Tratamientos *in situ*.
- Tratamientos *on site* y *ex situ* (*off site*): realizados sobre suelo excavado, ya sea en planta de tratamiento móvil o fija respectivamente.

Los tratamientos *in situ* constituyen el conjunto de técnicas que requieren un mayor conocimiento del suelo y el que se enfrenta de forma más clara con el gran problema de la heterogeneidad de los suelos. Por esta razón, resulta más difícil conseguir la recu-

peración total a través de ellas, especialmente si se dispone de cortos plazos de tiempo. Constituyen la única opción aplicable en los casos en que la excavación es imposible (suelos contaminados bajo estructuras edificadas o contaminaciones muy profundas, por ejemplo) o muy cara.

Aunque todos los tratamientos son de aplicación, tanto en casos de contaminación puntual como difusa, lo cierto es que siempre se aplican a situaciones de contaminación puntual.

Mención aparte merecen los tratamientos de macroencapsulación, basados en la construcción de barreras alrededor del suelo contaminado, con el fin de contener y aislar el foco de contaminación, limitar la exposición de la población a los contaminantes y reducir la entrada de las aguas de lluvia. Pueden completarse con la instalación de una cubierta superficial.

En la elección de la técnica o las técnicas a emplear en un emplazamiento determinado deben considerarse los siguientes factores:

- Tipo y concentración del contaminante.
- Estado físico del contaminante.
- Propiedades físicas, químicas del contaminante.
- Tipo de suelo.
- Edad de la contaminación.
- Volumen de suelo afectado y profundidad de la contaminación.
- Tiempo y recursos económicos disponibles.

Sin olvidar los diferentes actores que, en distintos momentos del proceso, pueden estar relacionados con las operaciones de saneamiento. Los diferentes actores que intervienen se hallan representados en la Figura 14.72.

Figura 14.72. Actores implicados en las distintas etapas de un proceso de saneamiento de suelos.

8.3.4.1. Tratamientos físicos

Lavado del suelo (Soil washing): Una de las tecnologías más utilizadas en el saneamiento de suelos. Se basa en el lavado de los contaminantes con agua y/o disolventes inorgánicos u orgánicos. En la práctica, la solubilidad del contaminante ha de ser mayor que 1.000 mg/l para hacerlo viable. En la técnica aplicada *in situ* el agua se introduce mediante zanjas y pozos, se recoge en unos drenes horizontales y se extrae por bombeo.

En ocasiones se pueden emplear detergentes para extraer contaminantes con comportamientos hidrofóbicos. Otra variante consiste en el uso de soluciones acidificantes (de ácido sulfúrico, clorhídrico, nítrico, fosfórico o carbónico), o soluciones básicas (de hidróxido sódico) y tensioactivos (ejemplo: alquil bencensulfonato) en varias etapas. La extracción ácida ofrece buenos resultados en el caso de los metales pesados.

En suelos contaminados con cesio, el lavado con soluciones salinas ricas en sodio y magnesio, es un buen procedimiento para su eliminación.

La efectividad del tratamiento depende de la permeabilidad, porosidad, homogeneidad, textura y mineralogía del suelo, así como del contenido en materia orgánica. En suelos ricos en materia orgánica, el agua, al quedar retenida por aquella, no arrastra a los contaminantes.

En el lavado *off site*, el suelo excavado es tratado con una solución acuosa en un tanque. Habitualmente, el suelo es tamizado previamente, para separar las fracciones más gruesas (generalmente, superiores a los 20 mm de diámetro). La fracción fina se mezcla con el líquido de lavado y posteriormente es aclarada. Después se separan las arenas, que tienen una capacidad muy baja de retención de contaminantes. Las arcillas y los limos continúan con el proceso de tratamiento. Todos aquellos materiales que conservan al final un alto porcentaje de contaminación son separados para su gestión en vertederos controlados.

Esta técnica es útil para una amplia gama de compuestos contaminantes: metales pesados, cianuros metálicos, disolventes nitrogenados, hidrocarburos aromáticos, gasolinas, aceites minerales, PCBs, etc.

Extracción de vapor: La extracción de la fase vapor de un suelo contaminado, en la que están presentes los gases contaminantes, se realiza a través de pozos; unos son de inyección de aire y otros son pozos de bombeo o extracción, proyectados con el fin

de maximizar la circulación de aire limpio en la zona contaminada. Las canalizaciones permiten que, previamente a la salida hacia la atmósfera exterior, los gases movilizados sean tratados, primero en un separador líquido-vapor para eliminar la humedad, y después con un adsorbente, normalmente carbón activo; si los medios lo permiten, también son aplicables tratamientos por oxidación catalítica o tratamientos térmicos.

Esta técnica resulta efectiva para el tratamiento de compuestos volátiles resistentes a la biodegradación, aunque está limitada a contaminantes orgánicos con constante de Henry superior a $3 \cdot 10^{-3}$ atm m^3/mol. La efectividad de esta técnica depende de la permeabilidad del suelo, porosidad, contenido en arcilla, contenido en agua, y temperatura principalmente.

Con aplicaciones de vacío en los pozos de extracción se consigue un desplazamiento del equilibrio gas-líquido-solución que permite optimizar la descontaminación hasta resultados cercanos al 100%, especialmente en suelos de textura arenosa y bien aireada. En suelos arcillosos los resultados no son nunca tan buenos.

Esta técnica no puede ser utilizada en climas muy fríos o cuando la temperatura exterior del aire es inferior a 0 °C y existe riesgo de helada de las conducciones.

Extracción con vapor de agua: En este caso se utiliza vapor o aire caliente para conseguir la extracción de los compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles. Al aumentar la temperatura del suelo, se ve favorecida la migración de compuestos menos volátiles y aumenta la efectividad del tratamiento. El sistema es inviable en suelos de baja permeabilidad.

El efecto de la vaporización se favorece si se calienta el aire de entrada. Este calentamiento se realiza mediante diversos sistemas; el más utilizado es la creación de un campo de microondas por electrodos tubulares clavados en el suelo.

La «vaporización asistida» es viable siempre que los contaminantes tengan temperaturas de cambio de fases (sólido-gas, líquido-gas) bajas y próximas unas de otras.

Solidificación/estabilización: Se incluyen aquí las tecnologías cuyo principal objetivo es:

- La inmovilización física o química de compuestos tóxicos o peligrosos presentes en el suelo por reducción de su solubilidad.
- La mejora del manejo de los contaminantes a través del paso a formas más sólidas y, por tanto, más fáciles de manipular.
- La reducción de la superficie de contacto entre contaminantes y agentes meteorizantes (agua, viento).

Con estas técnicas se reduce o limita la lixiviación de los contaminantes, sin eliminarlos del suelo.

Se utilizan para ello mezclas de: cemento Portland y materiales puzolánicos (cenizas volantes), cal y materiales puzolánicos, silicatos, termoplásticos y polímeros orgánicos, y técnicas como la microencapsulación y la sorción. La mezcla forma un sólido que puede dejarse en el emplazamiento o transportarse a vertedero controlado.

En algunas circunstancias, los métodos de solidificación/estabilización pueden requerir que el suelo sea excavado, entonces el suelo se extrae y coloca en grandes mezcladoras en la superficie del terreno.

En otros emplazamientos, los suelos y los aditivos se pueden mezclar directamente bajo tierra. La mezcla se prepara con grandes barrenas (*augers*) o paletas rotatorias. Habitualmente se excavan zanjas donde se inyecta el agente solidificante/estabilizante.

Una vez tratado, el suelo afectado se cubre con suelo limpio o bien con un pavimento.

El tiempo necesario para completarlas puede oscilar entre algunas semanas y unos pocos meses, dependiendo de los factores habituales citados para cualquier tipo de descontaminación, de la proporción contaminante/agente y de las condiciones de curado (de si la mezcla se realizó *in situ* o en tanques de mezcla).

Vitrificación in situ: Para su consecución se aplica un alto voltaje al suelo, utilizando electrodos entre los que se colocan placas de grafito para iniciar el proceso. Durante el mismo, se alcanzan temperaturas superiores a 1.400 °C, si bien algunos autores hablan de hasta 3.600 °C en zonas próximas a los electrodos. El producto final es una masa vítrea donde quedan confinados los contaminantes no volátiles, metales principalmente. Se precisa de un control de los gases que, de otra forma, serían emitidos hacia la atmósfera.

Se estima que la vitrificación consigue la inmovilización de los contaminantes durante más de 10.000 años.

El empleo de esta técnica se remonta a 1980 cuando se utilizó de forma experimental para la es-

tabilización de residuos radioactivos *in situ*. La vitrificación se ha utilizado también con éxito para cloruro de metileno, PCBs, estireno, tolueno y tricloroetano.

Los contaminantes orgánicos sufren en su mayor parte una especie de tratamiento pirolítico, aunque pueden escaparse al tratamiento por migración hacia zonas adyacentes.

El desplazamiento de los contaminantes se logra mediante la creación de campos eléctricos. Los contaminantes fluyen de un electrodo a otro siguiendo las líneas del campo eléctrico. Para favorecer el movimiento se puede añadir una fase acuosa. El desplazamiento a través del campo eléctrico es debido a fenómenos de: migración, electroósmosis y electroforesis.

- La *migración* es una movilización en forma iónica de los contaminantes a través del campo eléctrico. Las partículas en disolución se mueven así.
- La *electroósmosis* representa el movimiento del líquido con relación a las superficies sólidas del campo eléctrico. La movilización del líquido se produce por interacción con las paredes de los espacios porosos.
- La *electroforesis* representa el desplazamiento de las partículas coloidales cargadas que se hallan en suspensión en un líquido. Es el fenómeno que tiene un efecto menor sobre el desplazamiento de los contaminantes.

Este procedimiento tiene la ventaja de que apenas influyen en él la textura o la permeabilidad del suelo, parámetros limitantes de muchos tratamientos. Para una aplicación con éxito, solo es necesario que el suelo contenga cantidades significativas de materiales silicatados. Una desventaja puede ser el elevado coste de la electricidad necesaria para la total vitrificación de los materiales.

Tratamientos térmicos: Tienen como objetivo común la desorción de los contaminantes y su transformación a fase gaseosa. Los más habituales consisten en el tratamiento térmico directo del suelo excavado. La incineración está especialmente recomendada para algunos contaminantes orgánicos refractarios como los PCBs y algunos plaguicidas presentes en concentraciones medias y altas; también pueden ser incinerados compuestos con elevado calor calorífico como los hidrocarburos policíclicos, con la ventaja, en ese caso, de no precisarse combustible auxiliar, lo que abarata los costes. No son recomendables en suelos con concentraciones elevadas de metales.

La combustión de los contaminantes se consigue sometiendo al suelo a altas temperaturas (alrededor de 1.000 °C). El tratamiento se desarrolla en dos fases. En una primera, se volatilizan y oxidan la mayor parte de los contaminantes. El proceso se completa en una segunda etapa, en la que se mantiene al suelo a altas temperaturas durante el tiempo necesario para conseguir la destrucción completa de los contaminantes y la eliminación total de los gases.

Los distintos tipos de equipos muestran distinta capacidad de tratamiento: con la incineración en horno rotativo móvil se pueden tratar hasta 20 toneladas de suelo contaminado a la hora; con la incineración en lecho fluidizado, la capacidad máxima se reduce a 5 toneladas/hora. La incineración por infrarrojos tiene una capacidad de tratamiento cercana a las 6 toneladas/hora.

El contenido inicial en agua del material puede afectar el desarrollo del proceso y los costes del mismo, lo mismo que la presencia de compuestos halogenados.

Estos métodos presentan el inconveniente de que provocan grandes cambios en el suelo, eliminándose la materia orgánica y los microorganismos.

Otras modalidades son:

Calentamiento por radiofrecuencias: Consiste en el calentamiento del suelo *in situ*, con ayuda de electrodos, por aplicación de radiofrecuencias. Los gases y vapores que se forman durante el proceso se recogen en superficie. Se precisan entre 4 y 15 días para completar el tratamiento y las temperaturas que se alcanzan van de los 200 a los 600 °C.

Desorción térmica: es otro proceso térmico en el que se somete al suelo a temperaturas más bajas (250-550 °C) para conseguir la desorción, en lugar de la destrucción de los contaminantes. Con esta técnica, se puede tratar la contaminación producida por compuestos orgánicos volátiles, con un peso molecular no muy elevado, como los lubricantes, gasolinas, etc., y determinados metales pesados volátiles como el mercurio.

Electrocinética: Consiste en la aplicación de corriente directa de baja intensidad entre un sistema de electrodos situados en el suelo. La corriente moviliza los iones, partículas y especies cargadas pre-

sentes en la solución del suelo por alguno de los siguientes procesos:

- *Electromigración:* Transporte de especies químicas bajo un gradiente eléctrico.
- *Electroosmosis:* Transporte del fluido de los poros bajo un gradiente eléctrico.
- *Electroforesis:* Movimiento de partículas cargadas bajo un gradiente eléctrico.
- *Electrólisis:* Reacciones químicas asociadas al campo magnético.

La remediación electrocinética depende, entre otros, de factores como el tipo de suelo, tamaño de partícula, concentración del contaminante/s, movilidad iónica, concentración iónica total, especies químicas contaminantes y solubilidad de las mismas, etc. Pueden darse complicaciones en la aplicación de la electrocinética debido a la presencia de contaminantes orgánicos y de niveles altos de materia orgánica en el suelo. La Figura 14.73 muestra el principio de funcionamiento.

El agua, o alguna otra solución salina adecuada, puede ser añadida al sistema para aumentar la movilidad del contaminante e incrementar la efectividad de estas tecnologías. Es habitual el uso de soluciones amortiguadoras para estabilizar el pH del suelo.

Los contaminantes pueden ser eliminados por varios métodos, incluyendo la galvanización en los electrodos, precipitación o coprecipitación en los mismos, bombeo de agua cerca del electrodo, o complejación con resinas de intercambio iónico.

8.3.4.2. Tratamientos químicos

Su objetivo es el saneamiento de los suelos a través de la degradación química de los contaminantes. Las reacciones implicadas son frecuentemente reacciones de oxidación, y de reducción, éstas en menor medida, que afectan principalmente a los contaminantes orgánicos.

Oxidación química: Emplea como agentes oxidantes al oxígeno, peróxido de hidrogeno u ozono. Pueden usarse también permanganato potásico, hipoclorito y cloro gas.

Estos agentes se introducen en el suelo por inyección o bien se mezclan con los componentes del suelo. En el primer caso es preciso controlar los flujos preferenciales que puedan crearse, dado que van a limitar el contacto oxidante-contaminante, especialmente en suelos muy heterogéneos o en suelos de textura gruesa donde predominen las gravas.

Es un procedimiento idóneo para: aldehídos, ácidos orgánicos, fenoles, cianuros y plaguicidas organoclorados. Se conoce también muy bien el mecanismo de degradación por peróxido de algunos

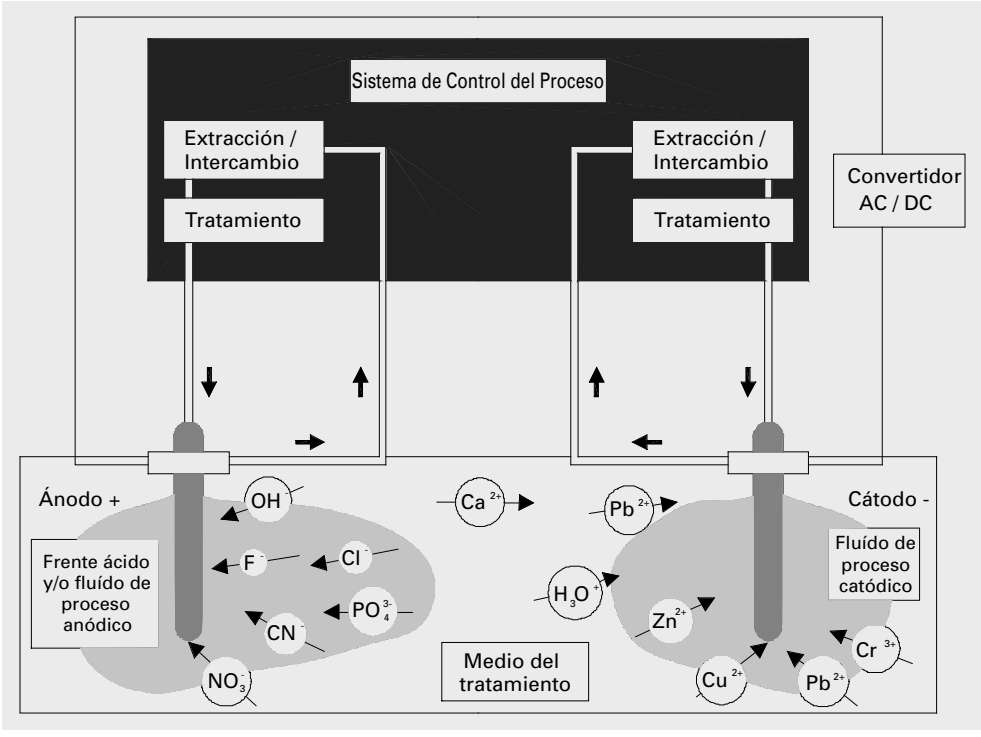


Figura 14.73. Esquema de un tratamiento electrocinético.

hidrocarburos del petróleo como naftaleno, fenantreno o pireno y el de algunos disolventes clorados como el tricloroetileno (TCE) y el tetracloroetileno. El uso del permanganato es más reciente, especialmente en el tratamiento *in situ* de disolventes clorados.

La eficiencia de los oxidantes es, en general, superior al 90% en el caso de hidrocarburos alifáticos no saturados como el tricloroetileno y en el de algunos compuestos aromáticos como el benceno.

Algunas circunstancias pueden limitar el éxito de aplicación de estas técnicas: la presencia de sustancias reductoras, como materia orgánica o algunos minerales de hierro; el grado de distribución del oxidante, o el riesgo de formación de metabolitos tóxicos, emisión de gases o movilización de metales.

Deshalogenación: esta técnica se utilizó inicialmente para la estabilización de productos derivados del petróleo. Se ha empleado con éxito para la descloración de bifenilpoliclorados BPCs (PCBs). Consiste en la inyección de CaO, $Ca(OH)_2$ o NaOH; el suelo, al reaccionar, se calienta y por incremento del pH hasta valores comprendidos entre 9 y 11 (el pH habitual de los suelos suele situarse entre 6 y 8 unidades) se produce la deshalogenación de los PCBs.

La reacción más utilizada es la descloración con glicolato potásico de polietileno (KPEG) de PCBs, dioxinas y clorobencenos. Se precisa un lavado posterior del suelo para eliminar el exceso de KPEG, que puede ser reciclado.

Otros procedimientos utilizan glicolato de polietileno básico y, como catalizador, dimetil sulfóxido.

8.3.4.3. Tratamientos biológicos

Biorremediación: Consiste en el uso de los microorganismos naturales (levaduras, hongos y bacterias) existentes en el suelo, para descomponer o degradar sustancias peligrosas en sustancias de carácter menos tóxico o bien inocuas para la salud humana y los ecosistemas. Se emplea en casos de contaminación por plaguicidas, gasoil, gasolinas, aceites pesados y algunos compuestos halogenados.

Es sabido que los microorganismos que viven en el suelo y las aguas subterráneas son capaces de metabolizar la mayor parte de los compuestos orgánicos de síntesis que llegan a dichas matrices, y entre ellos, los hidrocarburos, cuya composición química es muy similar a la de los compuestos orgánicos naturales, generando principalmente agua y dióxido de carbono.

Estos sistemas de descontaminación se basan en la digestión de las sustancias orgánicas por los microorganismos, de las cuales obtienen la fuente de carbono necesaria para el crecimiento de sus células y una fuente de energía para llevar a cabo todas las funciones metabólicas que necesitan para su crecimiento.

Para que estos procesos metabólicos se lleven a cabo a pleno rendimiento, y puedan ser utilizados en el saneamiento de las matrices ambientales, deben darse unas condiciones óptimas de humedad, temperatura y nivel nutricional en los suelos.

El fundamento bioquímico de la biorremediación se halla en las reacciones de óxido-reducción que tienen lugar en la cadena respiratoria con el fin de obtener energía. La cadena la inicia un sustrato orgánico, algún hidrocarburo, por ejemplo, que actúa como dador de electrones, de modo que la actividad metabólica de la célula acaba degradando y consumiendo dicha sustrato. Los aceptores de electrones más comúnmente utilizados por los microorganismos son el oxígeno, los nitratos, el hierro (III), los sulfatos y el dióxido de carbono. Cuando el oxígeno es el agente utilizado como aceptor de electrones, la respiración microbiana se produce en condiciones aerobias, y los procesos de biodegradación son de tipo aerobio; sin embargo, si utilizan los sulfatos o el dióxido de carbono, la respiración de los organismos se produce en condiciones reductoras o anaerobias, y los procesos de biodegradación son de tipo anaerobio. La Figura 14.74 sintetiza ambos procesos.

Degradación aerobia:

$$\text{Sustrato} + O_2 \rightarrow \text{biomasa} + CO_2 + H_2O$$

Degradación anaerobia:

$$\text{Sustrato} + (NO_2^{3-}, SO_4^{2-}, Fe^{3+}, Mn^{4+}, CO_2) \rightarrow \text{biomasa} + CO_2 + (N_2, Mn^{2+}, S^{2+}, Fe^{2+}, CH_4)$$

Figura 14.74. Degradación aerobia y anaerobia.

La mayoría de los contaminantes orgánicos se degradan bajo condiciones aerobias. Sin embargo, determinados compuestos, como los compuestos alifáticos clorados, que resultan estables en condiciones aerobias, son fácilmente degradados en condiciones anaerobias. Otros incluso, como es el caso de los PCBs, se degradan primero en condiciones anaerobias, produciéndose una decloración rápida, para luego continuar su degradación bajo condiciones aerobias.

Los microorganismos responsables de la degradación de los contaminantes orgánicos presentes en suelos y aguas son: bacterias, hongos y protozoos. Alrededor de 22 géneros de bacterias y 31 géneros de hongos han sido identificados como capaces de degradar hidrocarburos.

Existe especificidad en dicha degradación. Así, el género *corynebacteriun* es efectivo en la degradación de PCBs clorados en las posiciones 4,4', mientras *pseudomonas* es efectivo para la decloración de PCBs en las posiciones 2,5,2',5'.

La biorremediación puede darse de forma natural pero a unas velocidades que son insuficientes para conseguir la rápida degradación de los compuestos orgánicos peligrosos para la salud. En condiciones controladas, y previo aporte de los nutrientes y el oxígeno necesarios, puede acelerarse el proceso, con lo que los microorganismos se reproducirán más rápidamente.

Los microorganismos capaces de degradar gran parte de los compuestos orgánicos se encuentran habitualmente en el suelo; sin embargo, en ciertos casos, por ejemplo, cuando las concentraciones de contaminantes son muy elevadas, o no se ha suministrado el oxígeno o los nutrientes necesarios, es necesario resembrar el suelo con nuevos individuos procedentes, por ejemplo, de poblaciones naturales seleccionadas en el laboratorio.

Existen dos metodologías de biorremediación en la práctica: la aumentada y la no aumentada. En la primera el tratamiento implica la adición de microorganismos. En la no aumentada se utilizan sustancias químicas para activar a los microorganismos que están presentes de forma natural en el suelo. La aplicación de sustancias químicas en el saneamiento biológico de suelos contaminados empezó a utilizarse tras el desastre ecológico producido por los vertidos del buque petrolero Exxon Valdez en las costas de Alaska.

Los diferentes métodos utilizados, en función de las condiciones específicas, son:

- *Biodegradación in situ*: consistente en potenciar la biodegradación natural del suelo mediante aporte de nutrientes (fósforo y nitrógeno), oxígeno y, a veces, inoculación de bacterias. Es necesario, en ocasiones, ajustar algunos parámetros como el pH y la temperatura del suelo.
- El tratamiento *in situ* se usa en suelos permeables, cuando la contaminación afecta a los horizontes subsuperficiales, es decir situados por debajo de la superficie. Se perforan pozos por los que se inyectan agua a la que se le han añadido los nutrientes necesarios.

Bioventing o inyección de aire: tratamiento consistente en la ventilación forzada del suelo mediante la inyección a presión de oxígeno (aire) en la zona no saturada a través de pozos de inyección. Con la aireación del suelo se va a favorecer la descontaminación por dos vías: por volatilización, facilitando la migración de los contaminantes volátiles y por biodegradación, ya que, al incrementar la oxigenación del suelo, se estimula la actividad bacteriana.

El Bio-Sparge es un sistema patentado de biorremediación *in situ* de suelos y acuíferos. Funciona como un circuito cerrado dinámico que permite controlar la emisión de contaminantes a la atmósfera, la degradación del contaminante/s y los subproductos formados.

Si las condiciones del suelo no son adecuadas para una buena distribución de los nutrientes o el aire, o bien la temperatura ambiente es muy baja, puede procederse a la excavación del mismo y a su tratamiento *ex-situ* mediante técnicas basadas en el mismo principio, como son:

Landfarming: el suelo es aireado por volteo, recogiéndose los lixiviados generados para un posterior tratamiento y reutilización. Este sistema permite un buen control del proceso de degradación si se lleva a cabo la construcción de una celda en la cual se coloca el material contaminado y un sistema de riego, y se aplican sustancias que favorezcan la actividad biológica.

Se precisa el acondicionamiento previo del terreno, para colocar las capas («*liners*») de polietileno de alta densidad (HDPE) y un sistema de recogida de lixiviados. Algunas veces se opta por colocar una cama de arena, para proteger el «liner» contra rasgaduras y evitar así una potencial dispersión del contaminante.

Biopilas: acopios regulares de suelo, situados sobre un lecho de grava de 10 a 15 cm de espesor,

que contienen en su interior tuberías de aireación de PVC, que se colocan durante la construcción. Los tubos están conectados a un soplador para forzar el paso del oxígeno atmosférico a través de las pilas.

Las biopilas se utilizan cuando la sustancia contaminante es demasiado volátil como para ser tratada por «landfarming», ya que en ese caso las emisiones gaseosas serían elevadas, o cuando se quiere acelerar el proceso de remediación. Una variante son *las biopilas con compost,* un compost maduro, enriquecido en microorganismos, que se mezcla con la matriz afectada.

Todos los tratamientos biológicos están condicionados por factores específicos como:

- Biodegradabilidad de los contaminantes.
- Presencia de sustancias inhibidoras de la degradación.
- Temperatura del suelo.
- Concentración de oxígeno en el suelo.
- pH del suelo.
- Concentración de nutrientes en el suelo.
- Solubilidad de los contaminantes presentes.

En cuanto al tiempo necesario para la descontaminación, póngase por caso, de hidrocarburos derivados del petróleo, un cálculo realista lo situaría entre 90 y 150 días, aunque, dependiendo de los factores anteriormente, citados ese período podría alargarse hasta 18 meses.

Una de las ventajas de estas técnicas es su bajo coste, que está entre el 30 y 50% menos que otras técnicas convencionales.

En el DVD adjunto, en el punto 13, se muestra más información sobre sistemas de biorremediación de suelos.

Atenuación natural: no está considerada como una técnica de descontaminación propiamente dicha. Se basa en el aprovechamiento de los procesos físico-químicos y biológicos que tienen lugar de forma natural en el suelo. Los procesos más interesantes son los de la biodegradación natural.

Fitorremediación: consiste en el uso de sistemas verdes para el saneamiento no sólo de suelos, sino también de sedimentos y de aguas contaminadas. Reúne un conjunto de tecnologías contrastadas que permiten gestionar una gran variedad de contaminantes presentes en los horizontes más superficiales del suelo, en los sedimentos o en las aguas, entre los cuales se pueden citar: metales, metaloides, radionúclidos, hidrocarburos del petróleo, plaguicidas, explosivos, disolventes clorados y diversos subproductos industriales.

Estas tecnologías aprovechan los procesos metabólicos e hidráulicos que, de forma natural, se desarrollan en las plantas superiores.

El grupo de tecnologías de fitorremediación puede contribuir, en condiciones controladas, a mejorar las situaciones de degradación de suelos y sedimentos dragados y a reducir los tiempos de recuperación naturales (atenuación natural).

Su paulatino avance tiene mucho que ver con una relación coste-eficacia muy favorable y un menor coste absoluto que la mayoría de los tratamientos habitualmente utilizados para la descontaminación de las mencionadas matrices.

Las tecnologías de fitoremediación pueden ser clasificadas según sea el destino de los contaminantes: extracción, contención, degradación, o bien, una combinación de varias de ellas.

En el caso de contaminación por metales, por ejemplo, las técnicas de aplicación son:

Fitoextracción: Basada en la absorción de contaminantes por las raíces y su posterior traslocación al interior de las plantas. Actualmente son dos las estrategias básicas de fitoextracción que se hayan en estado de desarrollo: la *fitoextracción inducida,* basada en el uso de sustancias quelantes para facilitar la movilización y posterior absorción, y la *fitoextracción continua,* basada en la utilización de plantas hiperacumuladoras y que resulta eficaz en la eliminación de metales como el zinc, el cadmio y el níquel, y formas aniónicas del selenio, arsénico y cromo.

Existen plantas hiperacumuladoras de metales en las familias Brasicáceas Euforbiáceas, Asteráceas, Lamiáceas, o Escrofulariáceas, y cultivos con menor capacidad acumuladora de los mismos (maíz, sorgo y alfalfa) que, no obstante, pueden resultar más efectivos debido a su crecimiento más rápido y su mayor producción de biomasa.

Los contaminantes susceptibles de ser extraídos son:

- Metales: Ag, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Zn.
- Metaloides: As, Se.
- Radionúclidos: ^{90}Sr, ^{137}Cs, ^{239}Pu, ^{238}U, ^{234}U.
- No metales: B.

Las plantas y restos vegetales deben ser recolectados para un posterior tratamiento de la biomasa. La biomasa puede resultar un recurso, como lo prueba la utilización de biomasa enriquecida en selenio como pienso para animales en zonas deficitarias en selenio.

Rizofiltracion: Consiste en la adsorción, precipitación sobre las raíces, o absorción en el interior de las raíces de los contaminantes presentes en la solución del suelo, a través de procesos bióticos o abióticos. Los exudados de las raíces pueden provocar, en ocasiones, la precipitación de algunos metales.

Esta tecnología no resulta idónea en suelos, sedimentos o residuos, ya que estos no suelen presentar niveles importantes de contaminantes en solución.

Aunque las plantas acuáticas son efectivas en estos tratamientos, las terrestres consiguen extraer mayor cantidad de contaminantes. Los girasoles parecen ser bastante eficaces en el tratamiento del ^{238}U, ^{137}Cs, ^{90}Sr.

El conocimiento de la química de las aguas, principalmente de la especiación química de todas las substancias presentes, resulta fundamental a la hora de determinar las posibles interacciones entre los contaminantes y los constituyentes del agua.

En algunos casos es preciso extraer el agua a tratar mediante sistemas mecánicos para facilitar la rizofiltración.

- Metales: Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn.
- Radionúclidos: Sr, Cs, U.

La eficacia frente a los contaminantes inorgánicos no metálicos y a los orgánicos no ha sido aún evaluada.

Fitoestabilizacion: Logra la inmovilización del contaminante en el suelo a través de mecanismos de absorción y acumulación en las raíces, adsorción sobre aquellas o precipitación en la rizosfera. Previene la migración de contaminantes por el viento o el agua, así como la lixiviación o dispersión de los mismos a través del suelo, resultando especialmente eficaz en el caso de suelos de textura gruesa y elevados contenidos en materia orgánica. La *fitolignificación*, una forma de fitoestabilización, implica la incorporación de contaminantes orgánicos a la lignina vegetal.

La contención e inmovilización de los contaminantes puede lograrse, tanto a través de: su «fijación» sobre los componentes más activos del suelo, como compuestos húmicos y minerales de la arcilla; su acumulación en las raíces, o por falta de su medio de transporte natural, el agua.

Debe prestarse especial atención al uso de enmiendas orgánicas, muy extendido últimamente, que pudieran tener propiedades fitotóxicas, y al de fertilizantes que pudieran aumentar la movilidad de algunos metales.

Esta técnica, que debe considerarse como una medida provisional, no implica la eliminación de los contaminantes, por lo que debe hacerse un seguimiento analítico del suelo y de las plantas para evitar futuras movilizaciones.

Tratamiento de metales: Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn y Metaloides: As. *Brassica juncea* resulta muy eficaz en la reducción de la lixiviación de metales en residuos mineros, con resultados por encima del 98%,

Fitovolatilizacion: Implica la desorción, metabolismo interno y transpiración de las plantas con la consiguiente eliminación de los contaminantes o sus metabolitos más volátiles. Paralelamente puede darse una fitodegradación de algunos de los contaminantes orgánicos.

Aunque ha sido utilizada principalmente para aguas subterráneas, también puede ser aplicada a suelos, sedimentos y residuos que dispongan de agua suficiente para asegurar las adecuadas tasas de transpiración.

Debe valorarse el riesgo sanitario y ambiental de la transferencia de contaminación entre matrices.

Tratamiento de inorgánicos y otros metales: As, Se y Hg. Orgánicos: TCE, TCA (ácido tricloro acético) y tetracloruro de carbono.

Rizodegradación: Consiste en la transformación de contaminantes orgánicos a través de la actividad microbiana, favorecida por la presencia de los exudados de las raíces, entre los que se hallan: azúcares, aminoácidos, ácidos orgánicos, ácidos grasos, esteroles, factores de crecimiento, nucleótidos, flavononas y enzimas. Estos exudados pueden contribuir incluso a incrementar la población microbiana.

Las raíces de las plantas contribuyen a crear un escenario más favorable a la biodegradación, al aumentar la aireación del suelo y reducir el exceso temporal de agua.

Diversos proyectos ponen de manifiesto su eficacia sobre: TNT (trinitrotolueno), TPHs (crudo, diesel y aceites pesados), PCP (pentaclorofenol), PAHs (hidrocarburos policíclicos aromáticos, entre los cuales se pueden citar al pireno y antraceno), BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xileno), plaguicidas (Atrazina, Metolachlor, Trifularin, Parathion, Diazinon, 2,4-D, 2,4,5-T), disolventes clorados (tricloroe-

tileno y tetracloroetano), pentaclorofenol, PCBs y tensioactivos (alquilbencensulfonatos lineales y etoxilato alcohol lineal).

La eficacia de la rizodegradación aumenta con el desarrollo radicular de las plantas. *Menta spicata, Medicago sativa* y *Glycine max* destacan entre las especies más eficaces.

Los inconvenientes de esta tecnología pueden ser limitantes en algunas circunstancias:

- Los efectos físicos y químicos de los exudados, así como cualquier aumento asociado de la población microbiana, pueden contribuir a modificar el pH del suelo, e interaccionar con los contaminantes.
- El volumen de suelo apto para el desarrollo de la técnica es inicialmente pequeño; con el tiempo se irá incrementando gracias al desarrollo radicular.
- Las plantas precisan una fertilización adicional, dada la competencia con los microorganismos por los nutrientes.
- Los exudados pueden estimular el desarrollo de los microorganismos no degradadores a costa del de los degradadores.
- Las tasas de degradación de los contaminantes pueden reducirse debido a la utilización de la materia orgánica de origen vegetal como fuente de carbono en lugar de la de los propios contaminantes.

La dispersión de contaminantes hacia la atmósfera es poco probable, ya que la degradación de los mismos se produce en las fases iniciales.

La *fitodegradación*: Incluye, tanto la transformación de contaminantes por los procesos metabólicos que se desarrollan en las plantas, como su transformación en el exterior con la participación de productos derivados (enzimas). Resulta especialmente idónea para el tratamiento de zonas extensas que presenten una contaminación superficial en, Atrazina, TCE, TNT (tri nitro tolueno), DDT, HCB (hexa cloro benceno), PCP (penta cloro fenol) y dietilhexilftalato, así como nitratos.

Algunos álamos parecen degradar al TCE (tricloroetileno), utilizando el carbono para el desarrollo de sus tejidos y excretando el cloro a través de las raíces.

Esta técnica puede competir con la biodegradación tradicional, ya que puede darse en suelos donde la biodegradación no es posible. La resistencia frente a concentraciones elevadas de contaminantes puede resultar mayor en el caso de plantas superiores que en el de microorganismos degradadores.

Los contaminantes más sensibles al tratamiento y que presentan una respuesta más rápida son los de carácter moderadamente hidrofóbico, que tienen un valor de log Kow (logaritmo del coeficiente de distribución octanol:agua) comprendido entre 0,5 y 3.

Los compuestos muy solubles no pueden ser absorbidos sobre las raíces o translocados al interior de las plantas. Las substancias de carácter hidrófobo pueden quedar retenidas sobre la superficie de las raíces e incluso penetrar hasta las raíces pero no pueden ser movilizadas hacia otras partes de las plantas.

En resumen, las fitotecnologías se han constituido en alternativas, que permiten reducir: a) la cantidad de subproductos residuales, b) el riesgo sanitario y ambiental de las operaciones de saneamiento que, en ocasiones, pueden resultar más elevados que los de las propias situaciones de contaminación, c) los elevados costes económicos de las tecnologías habitualmente empleadas, y d) el impacto negativo de aquellas sobre la calidad de los suelos.

Estas tecnologías pueden aplicarse en ecosistemas terrestres y acuáticos. Pueden utilizarse como etapas iniciales o finales de procesos más complejos de tratamiento, que reúnen a una batería de tecnologías para conseguir los objetivos de saneamiento.

A pesar de que su implantación como tecnología data de mediados de los 1990, la mayor parte de las técnicas de fitorremediación se basan en los conocimientos que, a lo largo de los años, han ido conformando las denominadas Ciencias del Suelo y que han tenido aplicación práctica en la agricultura, la silvicultura, la horticultura y en la resolución de problemas ambientales.

La selección de las plantas se realiza en función de la profundidad que alcanza su zona radicular. Algunas plantas pueden ver ampliado su campo de acción si los exudados radiculares tienen la posibilidad de migrar a horizontes más profundos del suelo. Algunas de las plantas más utilizadas son: maíz, girasol, alfalfa, bambú y tabaco.

En ocasiones, es necesario realizar algunos pretratamientos con el objetivo de situar al suelo en las mejores condiciones para su rápida y más eficaz recuperación.

Los procesos de fitorremediación pueden resultar distintos según esté presente un único contaminante o bien se esté ante mezclas de contaminantes («*coktail*» de metales, por ejemplo) en la matriz a des-

contaminar. Si los contaminantes se presentan en mezclas oleosas su efecto negativo sobre el crecimiento de las plantas se dejará sentir en el éxito de la recuperación.

La denominada edad de la contaminación resulta también determinante. Los contaminantes que hayan permanecido un tiempo considerable en el suelo muestran una menor biodisponibilidad para las plantas, por lo que las tecnologías de fitorremediación, con excepción de la fitoestabilización, resultarán menos eficientes.

El coste mínimo de la limpieza de 15 cm de sedimento contaminado depositado en una hectárea está siendo valorado en el mercado internacional alrededor de los 3.000 euros.

En cuanto a la duración, se ha calculado una duración variable, según la tecnología aplicada, el nivel de contaminación, las condiciones del terreno, etc. que oscila entre 2 y 20 años para contaminaciones moderadas.

Es de destacar la aceptabilidad social de estas técnicas.

En el DVD adjunto, en el punto 14, se muestra información sobre las actuaciones de descontaminación llevada a cabo, en una localidad de Barcelona, por la empresa TQMA.

8.3.5. Pasivos industriales y *brownfields:* alternativas de gestión

Muchos pasivos y *brownfields* se hallan actualmente ubicados en áreas urbanas o periurbanas.

Se trata, en general, de solares e instalaciones industriales, en ruinas en numerosas ocasiones, que podrían ser revitalizados como áreas industriales pero que también podrían ser idóneos para la construcción de viviendas y oficinas, por su ubicación cercana a las vías de comunicación, por ejemplo, aunque dicha idoneidad puede estar cuestionada desde un punto de vista sanitario y ambiental.

El cuerpo de normativa ambiental cuyo texto habría que conocer, ver resumen en Tablas 14.33 y 14.34, a la hora de realizar una revitalización o un

Tabla 14.33. Normativa europea y española en vigor, que puede afectar más directamente a la revitalización industrial de pasivos industriales y brownfields

Directiva 2004/35/CE del Parlamento Europeo y del Consejo sobre responsabilidad medioambiental en relación con la prevención y reparación de daños medioambientales. *DO L 143 de 30.4.2004, p. 56/75*	Recomendación 75/65/CEE de la Comisión a los Estados miembros relativa a la protección del patrimonio arquitectónico y natural. *DO L 21 de 28.1.1975, p. 22/23*
Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. *DO L 327 de 22.12.2000, p. 1*	Ley 10/1998 de Residuos. *BOE 96 de 22.4.1998, p. 13372 a 13384*
Directiva 2006/12/CE del Parlamento Europeo y del Consejo relativa a los residuos. *DO L 114 de 27.4.2006, p. 9/21*	Ley 9/2006 sobre evaluación de los efectos de determinados planes y programas en el medio ambiente. *BOE 102 de 29.04.2006, p. 16820 a 16830*
Directiva 1997/11/CE del Consejo por la que se modifica la Directiva 85/337/CE relativa a la evaluación de las repercusiones de determinados proyectos públicos y privados sobre el medio ambiente. *DO L 97 de 14.3.1997*	Ley 6/2001 de modificación del Real Decreto legislativo 1302/1986 de evaluación de impacto ambiental (para determinadas actividades). *BOE 111 de 9.5.2001*
Reglamento 850/2004/CE del Parlamento Europeo y del Consejo sobre contaminantes orgánicos persistentes. *DO L 158 de 30.4.2004, p. 7/49*	Real Decreto Legislativo 1302/1986 de Evaluación de Impacto Ambiental. *BOE 155 de 30.6.1986*
Decisión 2455/2001/CE del Parlamento Europeo y del Consejo por la que se aprueba la lista de sustancias prioritarias en el ámbito de la política de aguas, y por la que se modifica la Directiva 2000/60/CE. *DO L 331 de 15.12.2001, p. 1/5*	Real Decreto 1131/1988 por el que se aprueba el Reglamento para la ejecución del Real Decreto Legislativo 1302/1986 de Evaluación de Impacto Ambiental. *BOE 239 de 5.10.1988* Real Decreto 9/2005 por el que se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados. *BOE 15 de 18.1.2005, p. 1833 a 1843*

Tabla 14.34. Normativa europea y española en vigor, que puede afectar más directamente a la reconversión de pasivos industriales y *brownfields* en viviendas

Directiva 2003/35/CE del Parlamento Europeo y del Consejo por la que se establecen medidas para la participación del público en la elaboración de determinados planes y programas relacionados con el medio ambiente. *DO L 156 de 25.6.2003, p. 17/25*	Decisión 2455/2001/CE del Parlamento Europeo y del Consejo por la que se aprueba la lista de sustancias prioritarias en el ámbito de la política de aguas, y por la que se modifica la Directiva 2000/60/CE. *DO L 331 de 15.12.2001, p. 1/5*
Directiva 2004/35/CE del Parlamento Europeo y del Consejo sobre responsabilidad medioambiental en relación con la prevención y reparación de daños medioambientales *DO L 143 de 30.4.2004, p. 56/75*	Recomendación 75/65/CEE de la Comisión a los Estados miembros relativa a la protección del patrimonio arquitectónico y natural. *DO L 21 de 28.1.1975, p. 22/23*
Directiva 2006/12/CE del Parlamento Europeo y del Consejo relativa a los residuos. *DO L 114 de 27.4.2006, p. 9/21*	Ley 10/1998 de Residuos. *BOE 96 de 22.4.1998, p. 13372 a 13384*
Directiva 2001/42/CE del Parlamento Europeo y del Consejo relativa a la evaluación de los efectos de determinados planes y programas en el medio ambiente. *DO L 197 de 21.7.200, p. 30/37*	Ley 6/1998 sobre régimen del suelo y valoraciones. *BOE 89 de 14.4.1998*
Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. *DO L 327 de 22.12.2000, p. 1*	Ley 9/2006 sobre evaluación de los efectos de determinados planes y programas en el medio ambiente. *BOE 102 de 29.4.2006, p. 16820 a 16830*
Reglamento 850/2004/CE del Parlamento Europeo y del Consejo sobre contaminantes orgánicos persistentes. *DO L 158 de 30.4.2004, p. 7/49*	Real Decreto Legislativo 1/1992, de 26 de junio, por el que se aprueba el Texto Refundido de la Ley sobre el Régimen del Suelo y Ordenación Urbana. *BOE 156 de 30.6.1992* Real Decreto 9/2005 por el que se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados *BOE 15 de 18.01.2005, p. 1833 a 1843*

cambio de uso, es amplio. A él habría que añadir alguna norma complementaria.

En cualquier caso, resulta primordial evaluar la calidad del suelo o los suelos implicados. Ver procedimiento en apartado 8.3.7.

8.3.1.1. Suelos excavados

Mención aparte merecen los suelos excavados. Existe jurisprudencia en el sentido de considerarlos como residuos. Por ello, en el caso de suelos que hayan sido excavados y objeto de acopio con anterioridad, podría aplicarse la normativa de residuos y en concreto la de clasificación de los residuos para decidir su destino final. Éste será, en la mayoría de ocasiones, se quiera o no, el vertido controlado. Por ello conviene tener en cuenta la Decisión del Consejo de Ministros de la UE por la que se establecen los criterios y procedimientos de admisión de residuos en los vertederos con arreglo al artículo 16 y al anexo II de la Directiva 1999/31/CEE, aparecida en el DOCE num. L11/27 de 16/1/2003 que deberá cumplirse en el futuro próximo en todos los estados miembros de la UE.

Hay que considerar un último factor a la hora de plantearse la gestión de los emplazamientos: enfrentarse a escenarios cambiantes a lo largo del tiempo y difíciles de prever. Por un lado los vaivenes de la coyuntura económica y política, que pueden llevar a la falta de medios para continuar aplicando sistemas de control previamente establecidos; por otro, los avances científicos en el conocimiento de las reacciones implicadas en los procesos de degradación ambiental o de los efectos de los contaminantes pueden generar demandas adicionales en el futuro.

8.3.6. Posibilidades de reciclaje de «suelos contaminados»

La falta de espacio en los vertederos controlados ha forzado a la búsqueda de soluciones, en ocasiones ingeniosas, para reducir las cantidades de materiales residuales a gestionar por esta vía. Por ello, en algunos casos, se han considerado las posibilidades del reciclaje de «suelos contaminados» como forma de reducir su volumen en los vertederos.

Hay que recordar aquí que el concepto de suelo contaminado ha evolucionado con el tiempo y ha pasado de ser una concepción científico-técnica a un concepto legal. Hace algunos años se consideraba suelo contaminado todo aquel que presentaba una modificación de sus propiedades químicas como consecuencia de la presencia de contaminantes. Hoy en día, suelo contaminado es aquel cuyas características han sido alteradas negativamente por la presencia de componentes químicos de carácter peligroso de origen humano, en concentración tal que comporte un riesgo inaceptable para la salud humana o el medio ambiente, y así se haya declarado mediante resolución expresa.

Así pues, los suelos contaminados considerados en algunas guías de reciclaje de residuos no son o no tendrían que ser suelos que supongan un peligro demostrado para la salud de las personas o la calidad de las matrices ambientales ni residuos con concentraciones elevadas de contaminantes o con lixiviados ricos en los mismos.

Algunas de las posibilidades de reciclaje más contrastadas aparecen en la Tabla 14.35.

Tabla 14.35. Reciclaje de suelos contaminados

Tecnología	Contaminantes	Uso final	Limitaciones
Incorporación a las masas asfálticas	Metales, Radionúclidos (a baja concentración) Plaguicidas y PCBs	Pavimentos Aislamientos	Riesgo de dispersión de contaminantes volátiles, si están presentes
Aprovechamiento energético	Disolventes orgánicos HTPs	Combustible	Contenido de cenizas Presencia explosivos
Fabricación de cemento	HTPs Metales	Material construcción	Restricciones técnicas o estéticas
Fabricación de ladrillos	HTPs Metales	Abrasivos Material cerámico Tuberías	Presencia de benceno

Estas prácticas contribuyen también a: reducir la utilización de las capas más fértiles de suelos naturales y suelos agrícolas como áridos en la construcción, atenuar el impacto del transporte de materiales hasta las áreas de vertido, asegurar *stocks* de materiales de construcción especialmente cuando la demanda es racional.

Para poder reciclar los suelos con las máximas garantías se aplican pretratamientos que mejoran su aspecto y calidad, como el esquematizado en la Figura 14.75.

Los pretratamientos consisten en tamizaciones, trituraciones y homogeneizaciones del matriz suelo, acompañadas por tratamientos separativos de componentes metálicos, por ejemplo, electroimanes o decantadores.

En ocasiones, se aplican tratamientos de solidificación/estabilización para asegurar la inmovilización de los contaminantes, antes de utilizar los suelos como pavimentos, por ejemplo.

También se lleva a cabo puntualmente, el reciclaje de suelos contaminados seleccionados en los que puede resultar rentable la recuperación por extracción de algunos contaminantes, metales por ejemplo, si existe una concentración elevada de los mismos.

8.3.7. Procedimientos a seguir, en caso de reutilización de emplazamientos potencialmente contaminados

La reutilización, ya sea por la revitalización ya en forma de cambio de uso de los emplazamientos, requiere siempre la evaluación de la calidad de los suelos implicados.

El procedimiento aplicado en la actualidad en España, muy similar al de otros países, se lleva a cabo en cuatro fases. Se expone a continuación, el esquema empleado en Cataluña, con su correspondiente terminología.

La primera fase, *fase de reconocimiento preliminar,* consiste en la recopilación de la información que permita valorar la posibilidad que se hayan producido en el pasado o se estén produciendo contaminaciones significativas del suelo sobre el cual se ha desarrollado una actividad potencialmente contaminante.

En esta fase se identifican los orígenes de la supuesta contaminación, lo que lleva a distinguir dos tipos de emplazamientos:

- Emplazamientos en que se desarrolla o se ha desarrollado una actividad potencialmente contaminante del suelo (APCs), de acuerdo con lo establecido en los artículos 3.1 y 3.2 del RD 9/2005.
- Otros emplazamientos relacionados con: denuncias de vertidos incontrolados, accidentes donde se hayan detectado substancias peligrosas, cambios de uso del suelo, etc.

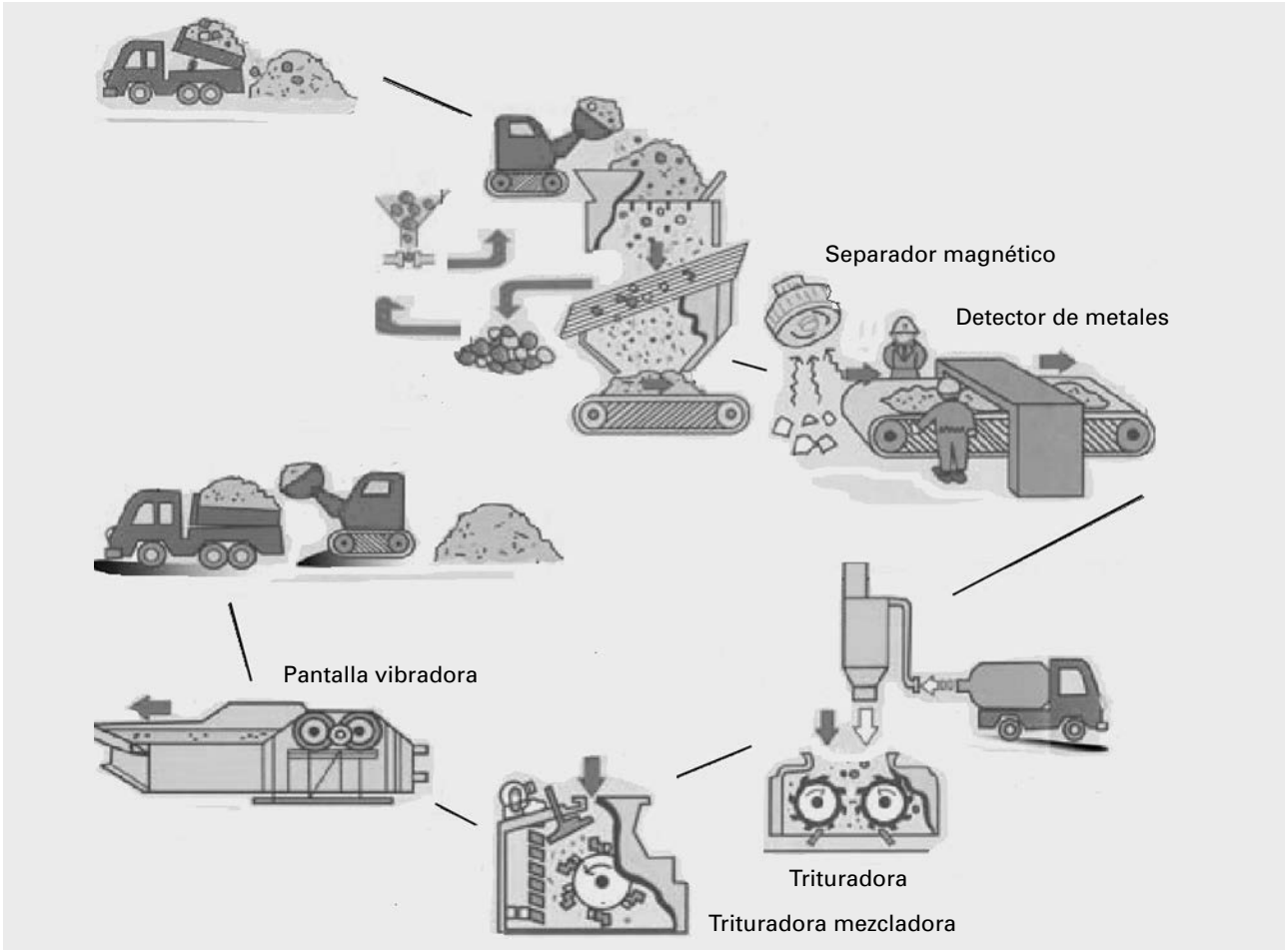


Figura 14.74. Pretratamientos aplicados a suelos contaminados para su reciclaje (fuente: *Public Works Bureau,* Osaka City).

La información necesaria asociada a esta fase es distinta según sea el origen del emplazamiento:

- En el caso de APCs, la documentación, de acuerdo al RD. 9/2005, se corresponde con la información solicitada en el informe preliminar de situación y los posteriores informes de situación.
- Para el resto de emplazamientos, la documentación se basa en «la información explicativa de los hechos ocurridos», información que ha de ser suficiente para permitir evaluar la sospecha de la existencia de indicios de contaminación.

La documentación reunida en esta fase ha de permitir determinar si hay indicios de contaminación del suelo relacionadas con APCs o con otros orígenes. La existencia de indicios de contaminación implica la necesidad de ampliar la información, dando paso a una nueva etapa de la investigación: la llamada *fase de evaluación preliminar.*

Esta fase corresponde a la realización del *informe de evaluación preliminar.* En él debe quedar definida y cuantificada la problemática, definido el origen y la naturaleza del foco de contaminación, identificados los vectores de transferencia y los objetos y/o sujetos a proteger, y definidas las actuaciones de emergencia, en caso de ser necesarias.

Esta fase comporta la realización de muestreos de suelos, sedimentos, residuos y/o aguas superficiales y/o subterráneas en caso necesario. Los resultados deberán ser evaluados e interpretados a la luz del objetivo de protección, el uso del suelo o los organismos a proteger, a través de la comparación con los niveles genéricos de referencia (NGRs) establecidos en el RD 9/2005 y con los NGRs para contaminantes inorgánicos establecidos por la Comunidad Autónoma correspondiente que ésta seleccione.

En esta fase también será necesario determinar, cuando el objetivo sea la protección de la salud humana, si la concentración en TPHs (hidrocarburos to-

tales del petróleo) supera los 50 mg/kg y, en caso de que el objetivo sea la protección del ecosistema, si existe toxicidad de acuerdo con los bioensayos especificados en el anexo IV del RD 9/2005.

Los resultados llevarán a dos tipos de conclusiones:

- Si no se superan los citados NGRs, el suelo estudiado no está contaminado. Si este hecho dependiese del uso del suelo, sería necesario establecer medidas de control en caso de cambio de uso.
- Si se superan los NGRs, el suelo estudiado presenta alteración de su calidad química y, por tanto, será necesario llevar a cabo una nueva fase de estudio que comporta la realización de una investigación detallada que incluya un análisis de riesgo.

La *fase de evaluación detallada* consiste en la realización de un informe de evaluación detallada que ha de permitir caracterizar con precisión el/los focos de contaminación, delimitar el alcance de la contaminación, determinar, a través de un análisis de riesgo si éste es aceptable o inaceptable y, en este segundo caso, obtener la información suficiente para pasar a la siguiente fase de estudio.

El análisis de riesgo es un proceso racional mediante el cual se identifican y evalúan los riesgos potenciales y reales que la degradación del suelo puede suponer para los objetos protegidos (salud humana, ecosistema, infraestructuras).

El objetivo del análisis es proporcionar, a partir de la estimación cuantitativa o cualitativa de los riesgos, la información y útiles necesarios para la valoración de los efectos asociados a la situación de contaminación del suelo. Es por tanto una herramienta a utilizar en la toma de decisiones.

En esta fase, el resultado del análisis de riesgo determinará si:

- El riesgo es aceptable, con lo que el suelo será considerado como no contaminado. Si este hecho depende del tipo de uso del suelo (industrial, urbano, otros usos), habrá que establecer las medidas de control a aplicar en caso de un cambio de uso.
- El riesgo es inaceptable y, por tanto, el suelo será considerado como contaminado.

La consideración de un suelo como contaminado comporta la obligación por parte del propietario de desarrollar actuaciones de recuperación ambiental del emplazamiento.

La fase de recuperación comprende tres etapas fundamentales:

- La redacción del proyecto de descontaminación, a partir de un análisis de las alternativas posibles de recuperación según criterios de viabilidad técnica, económica y ambiental.
- La ejecución del proyecto una vez aprobado. Comporta la necesidad de realizar un seguimiento y control de la evolución de la calidad del suelo y de las otras matrices ambientales implicadas y, en determinados casos, la realización de un análisis del riesgo residual.
- La comprobación final de la efectividad de las actuaciones llevadas a cabo mediante, si procede, la realización de un monitoreo a medio plazo. En caso que los resultados de la descontaminación no se ajusten a los valores establecidos como límites admisibles, en el análisis de riesgo, seria necesario realizar actuaciones adicionales.

Aquellos suelos que, dentro del emplazamiento, muestren niveles de concentración de los contaminantes considerados prioritarios para el caso por debajo de los niveles genéricos de referencia fijados para el uso actual y el uso futuro, y que presenten concentraciones de HTPs inferiores a 50 ppm podrán considerarse suelos limpios y ser utilizados sin ninguna limitación tanto si mantienen su posición, como si son excavados y reservados. Una buena práctica sería la de su utilización para formar la capa superficial o subsuperficial de áreas ajardinadas, según sea su nivel de fertilidad (consultar valores óptimos en Tabla 14.36).

Los suelos en los que se superen los niveles genéricos de referencia pero donde no exista un riesgo

Tabla 14.36. Valores óptimos de fertilidad de un suelo

Parámetro	Valores óptimos de fertilidad
Materia orgánica fácilmente oxidable (%)	> 2,9
pH (H_2O)	6-7,5
Conductividad eléctrica específica (dS/m)	< 2
Carbonato equivalente (% $CaCO_3$)	< 25
Caliza activa (% $CaCO_3$ fino)	< 10
Ca asimilable (mg CaO/kg)	> 3000
Mg asimilable (mg MgO/kg)	> 400
K asimilable (mg K_2O/kg)	> 200
Capacidad Intercambio Catiónico (meq/100 g)	> 50
N asimilable (%)	> 0,2
P biodisponible (mg P_2O_5/kg)	> 300

inaceptable para la salud humana ni para los ecosistemas deberían ser objeto de un seguimiento para conocer la evolución de los contaminantes, especialmente si se vislumbra un cambio de uso del suelo. Con el cambio de uso se impondría un nuevo análisis de riesgo para valorar si el suelo está o no contaminado para eso uso. Una buena medida, en el ínterin, consistiría en aplicar medidas de descontaminación pasiva (atenuación natural) o alternativas biológicas de tratamiento (bio y fitorremediación).

En los suelos en los que se superen los niveles genéricos de referencia y el análisis de riesgo indique un riesgo inaceptable para cualquiera de los sujetos/objetos a proteger para el uso considerado, deberán practicarse medidas de descontaminación antes de acometer cualquier otra iniciativa, adaptando los niveles de limpieza a los usos previstos.

La recuperación de un suelo no puede considerarse completada hasta que el terreno no dispone de una cubierta vegetal que le proteja frente a la erosión. Por otro lado, la cubierta se convierte en un test para valorar las operaciones de descontaminación.

La selección del método de revegetación (plantación manual o mecánica; siembra en hileras, a voleo, aérea o hidrosiembra) se ha de realizar en función de la topografía, superficie a tratar, condiciones climáticas, restricciones técnicas y tipo de vegetación a instaurar.

Complementariamente puede ser necesaria la estabilización de taludes, a través de:

- Colocación de empalizadas trenzadas.
- Aplicación de geotextiles y georedes.
- Construcción de muros de poca altura al pie del talud.
- Construcción de paredes artificiales.

En el DVD adjunto, en el punto 15, se muestra información suplementaria sobre estabilización de taludes.

Cuando en los emplazamientos existan edificios a demoler es necesaria una inspección exhaustiva de edificios e instalaciones para evitar que con la demolición se mezclen residuos contaminados. Un estudio previo identificará las partes de las edificaciones que deberán ser gestionados separadamente, bien por su composición, las tuberías y cubiertas de fibrocemento (Uralita®), por ejemplo, bien por la contaminación que han sufrido, como soleras afectadas por vertidos accidentales.

Es recomendable siempre la demolición selectiva a fin de contribuir a la máxima reutilización y valorización de los materiales de construcción.

Es preciso también diseñar un plan de control y seguimiento que permita valorar el impacto de las actuaciones para establecer las correspondientes medidas preventivas y correctoras.

Es preciso considerar siempre los aspectos relacionados con la seguridad y salud laboral. La regeneración de ruinas industriales puede suponer la exposición de los trabajadores a diferentes tipos de compuestos químicos, exposición que deberá ser controlada en todo momento.

En lo que se refiere al procedimiento a seguir con los residuos existentes en los emplazamientos, ya sean suelos excavados, materiales de deconstrucción, etc. se impone una caracterización previa. La caracterización básica es el primer paso del procedimiento de admisión de los residuos en las instalaciones de vertido y es obligatoria para cada tipo de residuo.

Si la caracterización básica de un residuo muestra que éste cumple los criterios para una clase de vertedero conforme a lo establecido en el punto 2 del anexo de la Decisión de la UE por la que se establecen los criterios y procedimientos de admisión de residuos en los vertederos, el residuo se considerará admisible en esa clase de vertedero. En caso contrario, el residuo no será admisible en esa clase de vertedero.

La posible clasificación del material en: residuo inerte, residuo no peligroso, residuo peligroso admisible en vertedero para residuos no peligrosos o residuo peligroso implicará que no supere ninguno de los valores límite de contenido total de parámetros orgánicos ni los valores límite de lixiviación establecidos para los distintos tipos de vertederos.

Los tipos de residuos relacionados con los pasivos industriales que pueden ser gestionados en vertederos para residuos inertes sin caracterización previa se muestran en la Tabla 14.37.

Tabla 14.37. Residuos admisibles, sin caracterización previa, en vertederos de residuos inertes

CER	Descripción	Restricciones
101103	Residuos de materiales de fibra de vidrio	Solamente sin aglutinantes orgánicos
170107	Mezclas de hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos	Solamente residuos seleccionados de construcción y demolición (*)
170504	Tierra y piedras	Excluidas la tierra vegetal, la turba y la tierra y las piedras de terrenos contaminados

(*) Residuos seleccionados de la construcción y demolición con bajo contenido en materiales de otros tipos como metales, plástico, residuos orgánicos, madera, caucho, etc. y de origen conocido.

Sin caracterización previa, no se admitirá ningún residuo de la construcción y demolición contaminado con sustancias orgánicas o inorgánicas peligrosas a consecuencia de procesos de producción en la construcción, contaminación del suelo, almacenamiento y uso de plaguicidas u otras sustancias peligrosas, etc., salvo si se deja claro que la construcción derribada no estaba contaminada de forma significativa. Ningún residuo de la construcción y demolición tratado, revestido o pintado con materiales que contengan sustancias peligrosas en cantidades significativas.

8.3.8. Casos prácticos

Seguidamente se citan algunos ejemplos de actuación en suelos contaminados.

8.3.8.1. Excavación y disposición en vertedero

En algunos emplazamientos con niveles de contaminación entre bajos y medios se ha venido optando por la excavación total del suelo y su depósito en vertedero controlado y el aporte de suelos limpios en espesores inferiores a los 50 cm.

Esta práctica se ha realizado en emplazamientos destinados a la construcción de nuevas viviendas.

Instalación de cubiertas

En ocasiones se recurre al cubrimiento de los suelos afectados con materiales edáficos que impidan la volatilización de contaminantes desde el volumen de suelo contaminado hacia la atmósfera. Un ejemplo lo constituye en el tratamiento dado a algunas escombreras en Almadén (Ciudad Real, España).

Descontaminación in situ

En Almadén, la empresa pública CIEMAT está desarrollando un proyecto de recuperación *in situ* por fitorremediación de suelos moderadamente contaminados por mercurio, con vistas a una posterior revitalización de la zona.

Descontaminación off site

En el proceso de desmantelamiento de la antigua cabecera de ENSIDESA en Avilés (Asturias, España) y de urbanización del Parque Empresarial Principado de Asturias se procedió a la excavación de los suelos contaminados y a su acopio en una zona próxima al puerto de la misma ciudad para proceder posteriormente a un tratamiento de desorción térmica en planta móvil.

En Barcelona, el proyecto Forum (ubicado en una antigua zona industrial) conllevó una actuación sobre 14 Ha en Sant Adrià de Besòs, contaminadas con cromo y arsénico principalmente. La contaminación afectaba, en promedio, a los primeros 8 metros de profundidad. Tras la excavación, se realizaron tratamientos de reducción y estabilización química antes del vertido en depósito controlado. El emplazamiento saneado fue reconvertido de depósito de residuos en zona de servicios.

8.3.9. Conclusiones a la reutilización de suelos contaminados

La calidad química del suelo, como recurso ambiental básico, ha de ser considerada desde la doble perspectiva preventiva y recuperadora, con el fin de garantizar su conservación y, al menos, los usos actuales del suelo en el futuro.

Si se aplica el concepto de desarrollo sostenible a los suelos, se ha de exigir, en primer lugar, un uso por las generaciones actuales que no restrinja o dificulte seriamente cualquiera de las necesidades de las generaciones futuras. Ya que no se sabe cuáles van a ser esas necesidades, hay que tomar la situación actual como punto de partida, lo que significa que hay que preservar las funciones que actualmente se adjudican a los suelos, evitando cualquier actividad o modificando situaciones que puedan comprometer irreversiblemente alguna de dichas funciones.

La sociedad actual tiene la responsabilidad de sanear los emplazamientos contaminados y gestionar adecuadamente los residuos que representen un riesgo inadmisible para la salud humana o para el ambiente, evitando con ello que los daños resultantes de los errores del pasado sean heredados por las generaciones futuras.

Uno de los objetivos del saneamiento de un suelo contaminado, es devolverle, con las necesarias restricciones, si es el caso, su valor ecológico y/o económico, para reintegrarlo al ciclo del desarrollo sustentable.

Aunque no sea posible remediar de inmediato todos los suelos contaminados, la generación actual tiene el deber de priorizar los casos más graves.

Una vez saneados los emplazamientos pueden destinarse al uso que ya tenían, a un nuevo uso, o a

un uso con restricciones dependiendo de los resultados obtenidos. La última alternativa sería su clausura por imposibilidad de desarrollo de las funciones propias del suelo.

Quedan pendientes algunas asignaturas, como la consideración de la calidad integral del suelo y no sólo de la calidad química, la protección conjunta de suelos y aguas, la protección de los emplazamientos contiguos a los contaminados, la coordinación de las Administraciones, o el desarrollo de sistemas de préstamos para la revitalización de zonas degradadas, la mejora de las técnicas de muestreo, etc.

9. La problemática y el futuro de los polvos de acería

Los aceros inoxidables se fabrican en horno eléctrico y, por lo tanto, los residuos serán de la misma naturaleza que los generados en la fabricación de los aceros comunes: escorias (que presentan la misma tipología y gama de aplicaciones que las escorias de aceros comunes) y polvos de acería.

El reciclado de polvos de acero inoxidable no es tan frecuente como el de acero común. En primer lugar por un problema de economía de escala: se fabrica mucho más acero común. En segundo lugar los óxidos de los metales que tienen aplicación directa como materias primas: PbO y ZnO son mucho menos abundantes. En general el grado de reciclado es muy bajo y la mayor parte va a la escombrera.

9.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS POLVOS DE ACERÍA

En el funcionamiento de los hornos eléctricos, para la producción de acero, se produce como principal contaminante, una gran cantidad de partículas de composición metálica y gases procedentes de la combustión de materias orgánicas (aceites, plásticos y similares) que acompañan a los materiales de carga (chatarra), debido a la presión interna creada en los mismos durante el calentamiento, fusión y tratamiento de la carga, mucha materia orgánica no se oxida y es arrastrada por la corriente de gases. La mayor parte de las emisiones tiene lugar durante las fases de fusión y soplado con oxígeno (humos primarios); en las operaciones de carga-descarga y cuando la bóveda del horno está retirada, tiene lugar una serie de emisiones no confinadas o fugitivas (humos secundarios).

La cantidad y el tipo de las partículas emitidas por los hornos eléctricos dependen de muchas variables, tales como la composición de la carga, la utilización de materiales oxidantes, la velocidad de fusión, la temperatura del horno, el estado físico de los fundentes y de la aplicación de oxígeno. Los humos primarios suponen del orden del 95% a 97% del total de las emisiones de materia particulada, correspondiendo el 3% a 5% restante, a los humos secundarios; la emisión también varía a través de las diferentes etapas del proceso, la máxima se alcanza durante la inyección de oxígeno y la segunda en importancia, durante el período de fusión. Se estima que el 75% de todas las emisiones se produce en la primera mitad del proceso, oscilando la cantidad de polvo emitido entre 12-14 kg de polvo por t de acero.

La generación mundial de polvos de acería de horno de arco eléctrico se estima del orden de 3,7 millones de toneladas por año. Las plantas Europeas generan entre 500.000 y 900.000 toneladas de polvo por año. Los mayores generadores son Italia (170.000 t/año), Alemania (160.000 t/año), Francia (140.000 t/año) y España (115.000 t/año). Del orden de 700.000-800.000 t/año de polvos son generados en Estados Unidos, cuya producción aumenta cada año un 4-6%.

Prácticamente la totalidad de los hornos de arco eléctrico instalados disponen de sistemas de captación y depuración de gases. Los humos primarios son extraídos de forma directa desde el horno a través de un conducto en forma de codo (cuarto agujero) situado en el techo del horno, mientras que los humos secundarios son captados mediante campanas montadas en la cubierta del edificio. Posteriormente ambos flujos gaseosos se unen en una conducción común que va a parar al equipo depurador, normalmente filtros de mangas y más raramente lavadores húmedos de alta energía (grandes instalaciones) y precipitadores electrostáticos. El esquema de la Figura 14.76 muestra el principio de funcionamiento de un horno eléctrico y la generación de polvo.

Los polvos de acería son en su mayoría óxidos de hierro y metales no ferrosos con un tamaño de partícula por debajo de 40 micras. Aunque la composición del polvo de acería es muy variable, ya que depende principalmente del tipo de chatarra utilizada

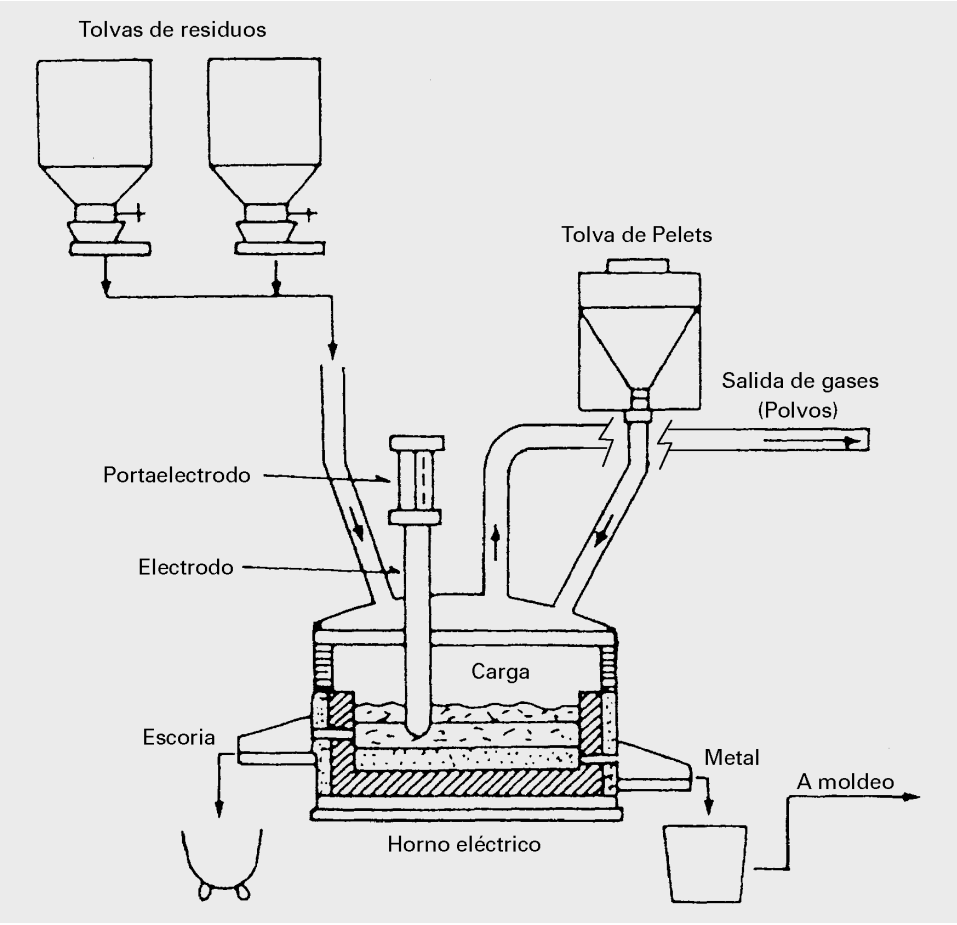


Figura 14.76. Generación de polvo y escorias de horno eléctrico.

y del proceso de fabricación seguido, en global se pueden distinguir dos tipos de polvo; los generados en la fabricación de aceros especiales (PE), donde la chatarra sufre una clasificación previa y la adición de diferentes aleaciones en función del tipo de acero a fabricar; y polvos procedentes de la fabricación de acero común (PC), de más alto contenido en carbono, que utiliza chatarra con más impurezas procedente generalmente de galvanizados, de menor coste y mayor contenido en zinc y plomo. En la Tabla 14.38 se muestra un análisis tipo de polvos de horno de arco eléctrico.

En cuanto a la caracterización, generalmente solo se hace referencia a la composición inorgánica de los polvos de acería, pero hay que tener en cuenta la contaminación orgánica de los mismos, ya que aunque el porcentaje de materia orgánica de las chatarras es pequeño, aproximadamente el 2%, al ser el volumen de chatarra tratado muy grande, estas sustancias químicas orgánicas pueden tener una incidencia significativa en la toxicidad de los polvos de acería.

Una gran parte de la chatarra son bienes de consumo comunes a nuestro tiempo como automóviles, electrodomésticos, etc. Que aparte, contienen otros materiales como fragmentos de plásticos, aceites hidráulicos, cubiertas protectoras, etc. Incluso realizando un esfuerzo para separar plásticos como PVC, los residuos pueden contener aún suficientes compuestos clorados e hidrocarburos para dar lugar a hidrocarburos halogenados, hidrocarburos aromáticos polocíclicos (HAP) y otros compuestos orgánicos durante el proceso de fundición.

Las propiedades físicas (granulometría) y la composición química (cantidades significativas de Pb, Cd, Cr o Ni) le confieren a los polvos de acería unas características especiales que pueden hacer de ellos graves agentes de contaminación ambiental mediante algunos de los siguientes mecanismos: Arrastre y dispersión de partículas por el viento, procedente de los almacenamientos de las industrias productoras, durante el transporte o en los vertederos; Arrastre y dispersión física de partículas por la lluvia; Lixiviación de los componentes por agua de lluvia con la

Tabla 14.38. Composición química de los polvos de acería generados en la fabricación de acero común (PC) y de aceros especiales (PE)

Componente	Alto contenido en carbón (PC)	Bajo contenido en carbón (PE)
Fetot	25-50	30-40
SiO_2	1,5-5	7-10
CaO	4-15	5-17
Al_2O_3	0,3-0,7	1-4
MgO	1-5	2-5
P_2O_5	0,2-0,6	0,01-0,1
MnO	2,5-5,5	3-6
Cr_2O_3	0,2-1	10-20
Na_2O	1,5-1,9	n/a
K_2O	1,2-1,5	n/a
Zn	10-35	2-10
Pb	0,8-6	0,5-2
Cd	0,02-0,1	0,01-0,08
Cu	0,15-0,4	0,01-0,3
Ni	0,02-0,04	2-4
V	0,02-0,05	0,1-0,3
Co	0,001-0,002	n/a
As	0,003-0,08	n/a
Hg	0,0001-0,001	n/a
Cl	1,5-4	n/a
F	0,2-0,9	0,01-0,05
S	0,5-1	0,1-0,3
C	0,5-2	0,5-1
Basicidad	2,0-6,5	n/a
Humedad	6-16	n/a

consiguiente contaminación de cauces de agua superficial y subterránea; Lixiviación generalizada en los ríos cuando se produce un episodio de contaminación ácida en los mismos; Corrimientos y desplomos de vertederos sobre cauces de agua.

Este potencial de contaminación condujo a que en EE.UU. y en la mayoría de los países Europeos, los polvos de acería fuesen considerados en la pasada década como residuos tóxicos y peligrosos, en base a sus respectivas normativas vigentes, haciendo necesario el control de su deposición en vertederos especiales o el envío a plantas de tratamiento. Actualmente en el marco legislativo Europeo están considerados como residuos peligrosos de acuerdo al Catálogo Europeo de Residuos con el código 10 02 07*, residuos sólidos de la industria del hierro y del acero procedentes del tratamiento de gases, que contienen sustancias peligrosas. En EE.UU. están clasificados por las agencias de control medioambientales como residuos peligrosos de Clase I, Código K061, siendo el Pb, Cd y Cr (VI) las especies consideradas más peligrosas, mientras que el Zn debido a su cantidad, relativamente grande, es el compuesto más valioso.

9.2. GESTIÓN DE LOS POLVOS DE ACERÍA

Entre las posibilidades de tratamiento de gestión de estos residuos, la más utilizada es la deposición en vertederos de residuos peligrosos después de un tratamiento de solidificación/estabilización usando habitualmente aglomerantes hidráulicos, estimándose el coste de tratamiento en aproximadamente 180 por tonelada. En la Unión Europea sobre dos tercios de los polvos generados son depuestos en vertederos, como indica la Figura 14.77. Por otro lado, a pesar del alto nivel de óxidos de hierro que contienen, el reciclado directo en alto horno o en horno de arco eléctrico prácticamente no se lleva a cabo debido a potenciales problemas operacionales.

En general y especialmente en países desarrolladas los procesos de tratamiento de polvos de acería comúnmente usadas persiguen principalmente la recuperación de zinc. Esto se debe al hecho de que en los últimos cuarenta años, este elemento ha sido usado progresivamente en procesos de galvanización de acero al carbono, lo cual ha incrementado su precio en estos países. Cuando la chatarra galvanizada es usada en hornos de arco eléctrico la mayoría de zinc procedente de la chatarra galvanizada termina en el polvo y gases debido a su baja solubilidad en el acero y escoria fundida, y especialmente porque la presión de vapor del zinc es mayor que la presión de vapor del hierro a las temperaturas de fabricación del acero. El zinc vapor sale del horno junto a otros gases o compuestos particulados generando durante las reacciones de fabricación de acero, ZnO y $ZnFe_2O_4$ (ferrita de zinc). El problema es que el zinc no sale solo, otros elementos se evaporan y son recogidos en los sistemas de depuración de gases, como se ha indicado anteriormente, originando los citados polvos de acería.

Otro método de tratamiento es la valorización por vía hidrometalúrgica o pirometalúrgica o híbrido de ambos. El objetivo de tratamiento es extraer metales no férreos como zinc y plomo para permitir el

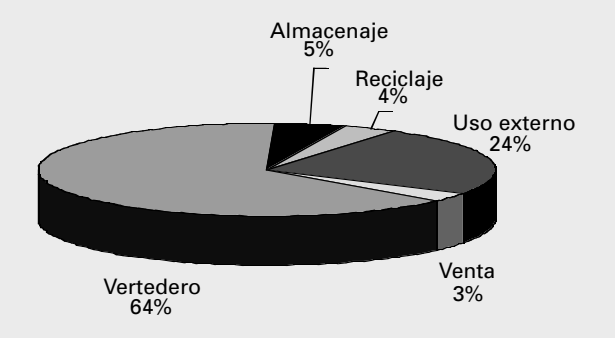


Figura 14.77. Destino de los polvos de acería generados en 67 plantas de la UE.

reciclado de la matriz en la industria del acero y evitar la deposición de las mismas.

Todos los procedimientos pirometalúrgicos propuestos contemplan una fusión reductora que conduce a la obtención de una escoria, mientras que el zinc y plomo se volatiliza y generalmente se recogen como óxidos en forma de vapor. El producto obtenido, de bajo valor comercial, se destina para venta directa o introducirlo en procesos de refinado posteriores. La mayoría de estas instalaciones están basadas en tecnología de horno rotatorio Waelz, las cuales para ser viables técnica y económicamente trabajan a gran escala y por lo tanto los polvos deben ser recogidos de numerosas fuentes y transportados a plantas de procesado relativamente grandes, y sobre todo, se requiere, que los polvos tengan alto contenido de zinc (> 15%) y plomo. Esta es la razón principal por la que este tipo de procesos no pueden ser utilizados para tratar todos los polvos de acería generados en hornos de arco eléctrico. Los procesos de tratamiento basados en plasma están en fase de desarrollo y son diseñados bajo petición para una capacidad específica. Por otro lado, los procesos pirometalúrgicos no permiten el reciclado directamente del polvo. El producto que se obtiene del proceso es una mezcla de óxidos de Pb, Zn y Fe, el cual tiene que someterse a un tratamiento adicional con objeto de ser reciclado. Varios procesos están actualmente a nivel comercial como Enviroplas (Sudáfrica), Almet (USA), Metwool (USA) y Ansmelt (Australia).

Los métodos hidrometalúrgicos, basados fundamentalmente en la recuperación de zinc, permiten la obtención directa del zinc electrolítico, de mejor calidad que el térmico, pero dejando una corriente residual con las mismas características que la inicial; conllevan la necesidad de disolución selectiva del zinc frente al hierro y que el agente lixiviante sea enérgico para separar el zinc de la ferrita. En procesos de lixiviación alcalina como Amax o Cebedan, los metales pesados son lixiviados en medio alcalino mientras el hierro no. En procesos ácidos el polvo de acería es lixiviado mediante ácido acético, sulfúrico o clorhídrico. Varias plantas fueron construidas para testificar tecnologías de este tipo tal como Ezinex o Intect. La forma en como se encuentra el zinc es el mayor problema de este proceso. El ZnO no causa ningún problema ni en lixiviación alcalina ni ácida. Sin embargo, del orden del 50% del metal está presente como ferrita de zinc y es prácticamente refractaria frente a la lixiviación. La lixiviación alcalina parece ser más ventajosa al ser selectiva de los metales pesados frente al hierro que permanece inerte, pero requiere medios de lixiviación relativamente concentrados, ya que el zinc presente en ferrosita es difícil de lixiviar siendo necesario un tratamiento térmico intermedio.

Un inventario de los diferentes sistemas existentes para el tratamiento de polvos de acería muestra que la mayoría de los procesos existentes están en fase de desarrollo o demostración, debido a ineficacias metalúrgicas y económicas, y solo unas pocas han dado lugar a procesos implantados comercialmente. Mientras que los procesos pirometalúrgicos encaran los problemas, como el alto consumo de energía y la generación de residuos sin valor, a pesar de obtener un alto rendimiento en la extracción de metales no férreos, los procesos hidrometalúrgicos suponen todavía una promesa para el futuro, a pesar de la enorme investigación realizada en este campo. Aunque este tipo de proceso podría ofrecer una alternativa interesante para el reciclado del zinc, por presentar costes más bajos, siempre que la disolución del hierro sea controlada y la extracción del plomo o lixiviación de la ferrosita sea viable. Por consiguiente encontrar un sistema sostenible, económicamente y medioambientalmente, supone actualmente el mayor reto. La elección del proceso va a depender básicamente de las características del polvo, tamaño de partícula, número de elementos valorizables y de las fases mineralógicas, ya que indican la cantidad de constituyentes lixiviables. Por lo tanto una caracterización detallada se convierte en una herramienta fundamental para definir la estrategia de reciclaje más apropiada.

9.3. RECUPERACIÓN DE Zn Y Pb. EL SISTEMA WAELZ

Es preciso destacar como sistema de reciclaje de polvos de acería ampliamente comercializado el proceso Waelz, el cual convierte los polvos en un óxido

principalmente de zinc impuro, denominado óxido Waelz, como producto y una escoria como subproducto.

El proceso Waelz consiste en mezclar los polvos con carbón como agente reductor y otros aditivos, como cal o arena de sílice, en un horno rotatorio. La temperatura en el horno es aproximadamente de 1.100 °C la cual permite reducir y generar vapores del Zn, Pb y Cd por sublimación. Estos vapores son reoxidados en la atmósfera libre del horno, dando lugar principalmente, después de una etapa de condensación, a un óxido impuro (óxido Waelz), con un contenido medio de 56% de zinc y 8% de plomo. Más tarde las fundiciones y las electrólisis transforman el óxido Waelz en zinc metálico.

La escoria gruesa, básicamente hierro con bajos contenidos de zinc y plomo, es enfriada con agua a la salida del horno para formar escoria granular Waelz, y la fina se recircula y vuelve a introducirse en el horno junto con el combustible. Dependiendo de la mezcla y composición del material que entra al horno, las condiciones de operación del horno y las características del enfriado de la escoria, dos tipos de escoria son obtenidas: escorias ricas de sílice y escorias ricas en cal.

Desde el punto de vista ambiental este proceso presenta el problema de generar una cantidad de residuo prácticamente equivalente a la materia prima a tratar, por lo que constituye un firme candidato para aplicarle las denominadas tecnologías limpias. Por otro lado, durante muchos años las bajas cantidades de escoria Waelz generadas han sido usadas localmente como material de base para la construcción de carreteras, suelo de pistas deportivas y diques. Sin embargo actualmente para su uso en concordancia con las regulaciones medioambientales, cada vez más restrictivas, es necesario caracterizar la escoria de forma más precisa, dando especial atención a su comportamiento de lixiviación a tiempos largos para estimar su comportamiento bajo condiciones de diferentes escenarios de valorización.

La Tabla 14.39 muestra el balance de los productos obtenidos por el reciclado de polvos de acería común, según el proceso Waelz.

Como ejemplo de un proceso de reciclaje y recuperación híbrido hay que destacar el que se lleva a cabo en Befesa Zinc Aser en la planta ubicada en Asúa-Erandio para tratar los polvos de acería generados principalmente en el País Vasco (España). Se desarrolla mediante dos procesos: uno pirometalúrgico, «el proceso Waelz», y otro hidrometalúrgico,

Tabla 14.39. Balance de productos obtenidos en el proceso de Waelz

Ley (%)	Polvo de entrada 100%	Óxido Waelz 34%	Escoria 66%
Zn	22-24	54-56	0,2-0,4
Pb	4-5	9-11	0,1-0,2
Cd	0,03-0,1	0,1-0,2	—
Cu	0,2-0,4	0,03-0,04	0,3-0,5
Sn	0,2-0,3	0,2-0,4	0,1-0,2
As	0,04-0,08	0,01-0,02	0,05-0,1
S	1,8-2,2	1,4-1,8	1,5-2,5
F	0,2-0,4	0,4-0,8	0,1-0,2
Cl	1-1,5	2-4	0,03-0,05
C	1-2	0,2-0,8	5-10
FeO	26-30	3-4	34-38
MnO	4-5	0,6-0,8	5-6
CaO	6-7	0,4-0,5	8-9
MgO	2,5-3	0,01	3-4
BaO	0,01	0,1-0,15	0,1
Al_2O_3	0,4-0,6	0,5-0,7	2,5-3,5
SiO_2	3-3,5	2-2,5	35-37
Na_2O	1,5-1,9	2-2,5	1,2-1,6
K_2O	1,2-1,5	2-2,5	0,7-0,9
H_2O	9-11	—	5-15

«el proceso *Double Leaching Waelz Oxide*», patentado por ASER. Los polvos residuales de las acerías son alimentados a un horno rotativo Waelz, junto con coque utilizado como combustible y agente reductor de los elementos oxidados, y con cal utilizado como agente escorificante, obteniéndose el Oxido Waelz y unas escorias que constituyen un subproducto denominado Ferrosita®, con múltiples aplicaciones como por ejemplo árido natural y material de relleno en la industria de la construcción. La Figura 14.78, muestra el esquema del proceso Aaelz.

El óxido Waelz formado es transportado por la corriente gaseosa que fluye del horno hacia el sistema de depuración de gases, constituido por una cámara de sedimentación, una torre de acondicionamiento y un electrofiltro. Una vez captado es sometido, en función de las preferencias de mercado, a un proceso físico de briqueteado en caliente (prácticamente en desuso) cuyo mercado son las fundiciones *Imperial Smelting* o a uno hidrometalúrgico de doble lixivia-

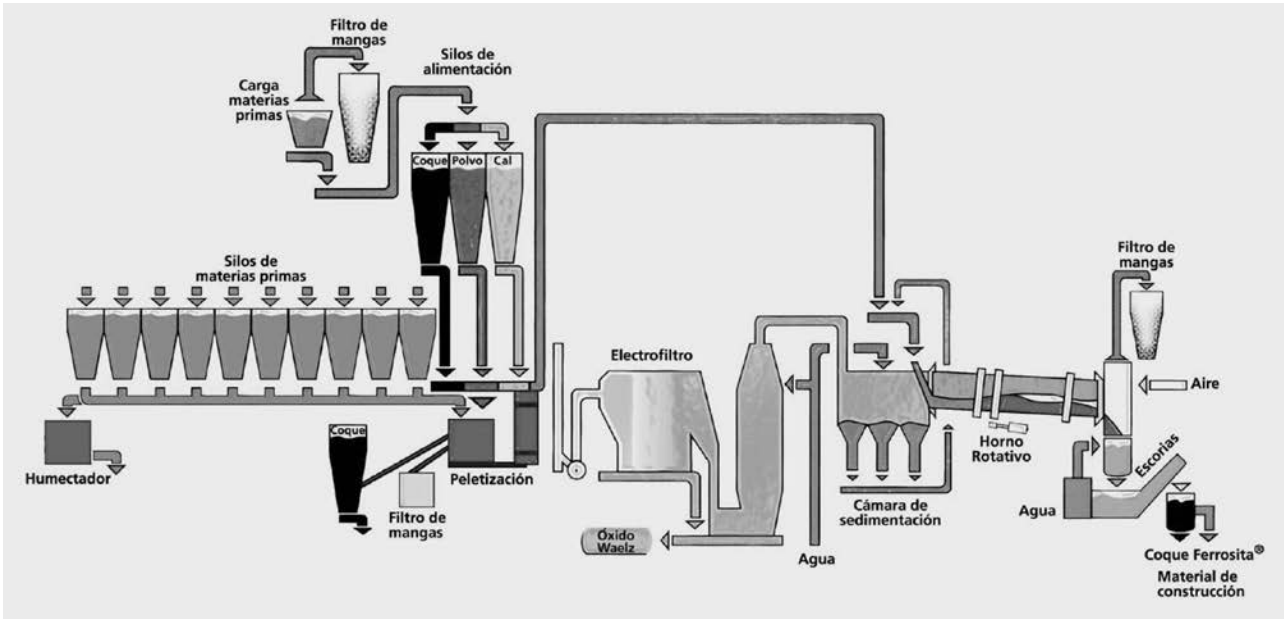


Figura 14.78. Proceso Waelz.

ción, mediante una solución básica a una temperatura de 65 °C, en donde se depuran los halógenos (predominantemente los cloruros) y los alcalinos que contiene, cuyo mercado son las electrolisis, como el ejemplo representado en la Figura 14.79. Tras las etapas de lavado, se obtiene un óxido Waelz más puro, y un efluente líquido. Este efluente se envía a la planta de tratamiento fisicoquímico donde se adiciona SHNa, que provoca la precipitación de las trazas de los metales contenidos y posteriormente se reciclan en el horno Waelz.

El proceso del horno Waelz en ASER tiene un índice de recuperación de zinc superior al 90% mientras que el Double Leaching es capaz de eliminar más del 95% de cloro contenido, produciendo así un Óxido Waelz depurado.

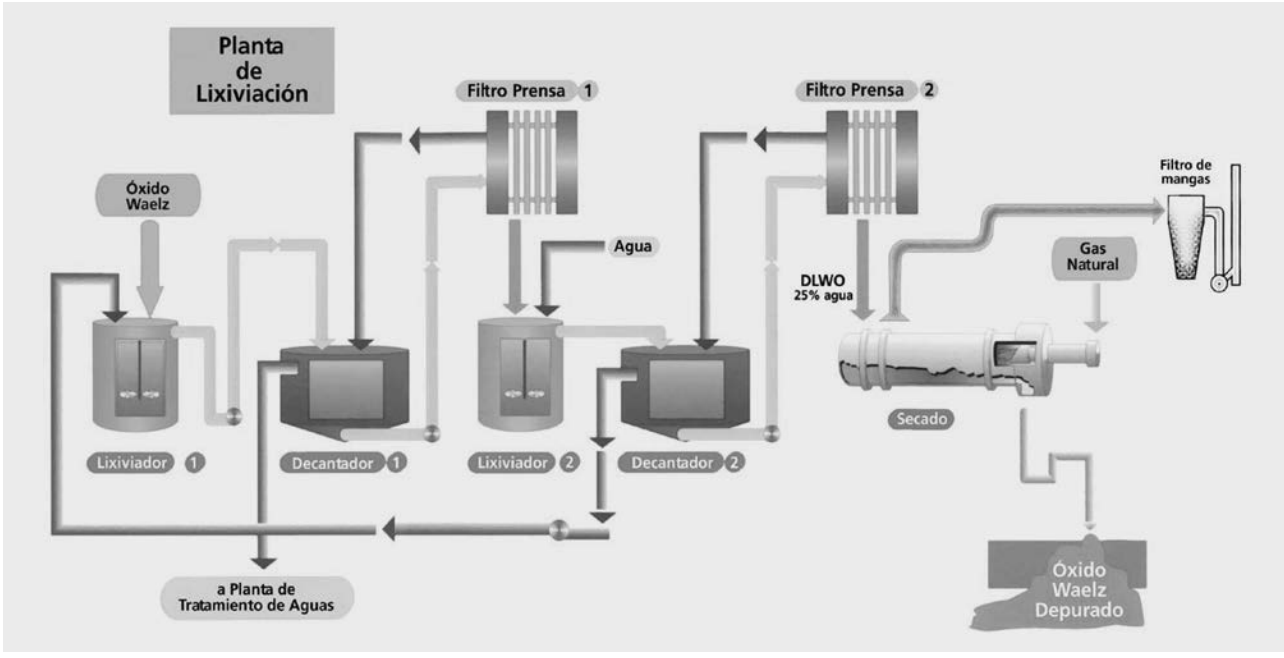


Figura 14.79. Planta de lixiviación de óxido Waelz. Asúa-Erandio (Vizcaya, España).

10. Gestión y tratamiento de los residuos radioactivos de alta actividad

El progreso y la evolución económica de nuestra sociedad postindustrial están cada vez más ligados a una creciente dependencia energética. En este contexto, la Comisión Europea ha llevado a cabo recientemente un análisis del futuro energético de la Unión para el periodo 2000-2050 en el marco del documento que se denominó *Libro Verde de la Energía*, cuyos resultados son de interés para definir lo que se debería denominar la transición energética española. Los principales resultados de interés se resumen a continuación. Esta introducción conlleva implicito un mensaje sublimizar, que contempla la reactivación de la energía nuclear y su inevitable consecuencia: los residuos de alta actividad.

10.1. EVOLUCIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA EN LA UNIÓN EUROPEA

La demanda de energía de la Unión Europea ha aumentado desde 1986 a un ritmo del 1% o 2% anual. Como reflejo del paso de una economía industrial a una economía de servicios, la estabilidad del consumo industrial se ha visto contrarrestada con creces por el auge del consumo de los hogares y del sector terciario en electricidad, transporte y calor.

La industria europea ha progresado en el campo del ahorro energético invirtiendo en modernización. Se ha esforzado por liberarse del petróleo (que representa el 16% del consumo energético total de la industria) y por diversificar el consumo a favor del gas natural y la electricidad. La intensidad energética del sector ha descendido un 23% entre 1985 y 1998. La estabilidad del consumo entre 1985 y 1998 se ha visto especialmente favorecida por la introducción de la cogeneración y de tecnologías más eficaces, pero también se ha incrementado notablemente el consumo energético en el sector transporte y residencial compensando, lamentablemente, con creces el incremento en eficiencia energética de la industria.

Los hogares y el sector servicios representan el principal ámbito de consumo final de energía en términos absolutos. Hasta ahora, este sector había registrado un crecimiento moderado, acompañado de un descenso de la intensidad energética, aunque parcialmente compensado por el progreso sistemático del confort. Esta tendencia induce en el mercado energético un aumento del consumo por habitante, especialmente de electricidad.

El sector del transporte constituye, sin duda, la gran incógnita energética del futuro mercado cautivo del petróleo (el 98% del mercado del transporte depende del petróleo, lo que equivale al 67% de la demanda final de petróleo). Este sector ha registrado un importante crecimiento de la demanda energética: entre 1985 y 1998 la demanda se incrementó de 203 millones a 298 millones de tep, mientras que el número de vehículos, particulares y utilitarios aumentó de 132 millones a 189 millones, con un auge paralelo del transporte aéreo. La intensidad energética del sector se incrementó en un 10% entre 1985 y 1998. Se estima que dicha intensidad seguirá creciendo en torno a un 2% anual durante el próximo decenio. En la Unión Europea se prevé que desde el momento presente hasta el año 2010 se registrará un crecimiento del transporte de pasajeros del 19%, distribuido principalmente entre el coche (16%) y el avión (84%). El transporte de mercancías se incrementará en un 38%, crecimiento encabezado por el transporte por carretera (50%) y por vía marítima (34%).

Esta dependencia de los combustibles fósiles, aumento del consumo energético per cápita e intensidad energética es más acusado en España que en la media de los países de la UE. La Figura 14.80 muestra la evolución prevista del consumo energético en la UE para las próximas décadas.

En los últimos años, la demanda de electricidad ha aumentado con más rapidez que todas las demás formas de energía. Hasta el año 2020, dicho crecimiento se desarrollará, en la UE, a un ritmo sostenido y similar al del PIB. Por ello, se estima que en el año 2020 las capacidades instaladas en la Unión Europea alcanzarán entre los 800 GWe y los 900 GWe, frente a los 600 GWe actuales.

A falta de un avance tecnológico revolucionario, el excedente de demanda deberá cubrirse con los productos energéticos disponibles en el mercado: gas natural, carbón, petróleo, energía nuclear y energías renovables. La producción de electricidad actual se reparte entre la energía nuclear (35%), los combustibles sólidos (27%), el gas natural (16%), la energía hidráulica y otras (15%), y el petróleo (8%). El nuevo mercado energético se caracterizará por el

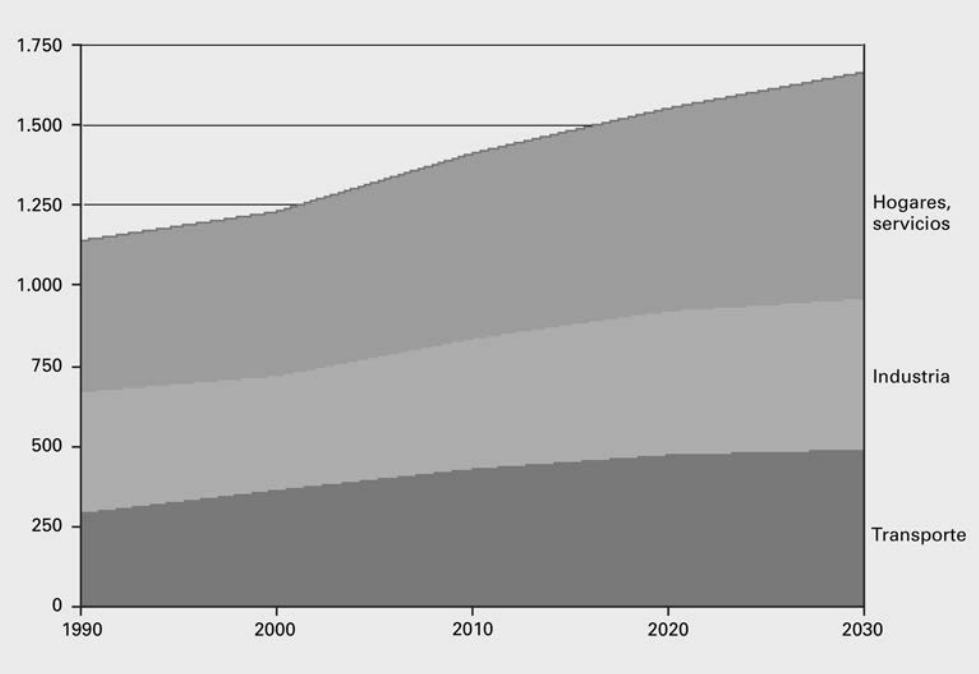


Figura 14.80. Evolución y estimación del consumo de energía para distintos sectores en millones de tep. (Reproducido de *Annual Energy Outlook,* 2006).

predominio de las centrales de gas y el retroceso continuo de las centrales alimentadas con productos petrolíferos y combustibles sólidos.

El crecimiento, a gran escala, de la energía nuclear parece, por el momento, improbable. Su contribución a largo plazo depende de la prosecución de la política de lucha contra el calentamiento del planeta, de su competitividad con respecto a las demás energías, de la aceptación pública de esta forma de energía y de una solución al problema de los residuos. La contribución de la energía nuclear en las circunstancias políticas actuales (decisiones de abandono del sector adoptadas por ciertos Estados miembros) se limitará probablemente de aquí al año 2020 a mantener el *statu quo*. A medio plazo, la posible caída en desuso de la energía nuclear podría traducirse, si no se producen nuevas inversiones, en una cuota de utilización más alta de las centrales térmicas. No obstante, estas previsiones podrían revisarse si evoluciona la tecnología de las centrales nucleares (es decir se proyecten centrales termonucleares de tercera y cuarta generación) y gracias a una contribución reforzada de las energías renovables y a la acción sobre la demanda. La Figura 14.81 muestra el «mix» de energía en algunos países de la UE.

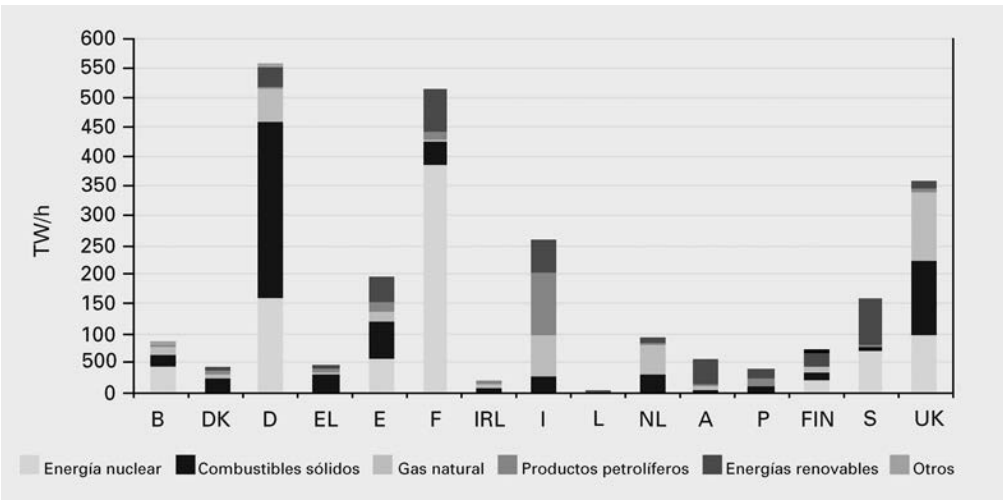


Figura 14.81. Consumo de energía de diferentes países en función del recurso energético utilizado. (Reproducido de *Annual Energy Outlook,* 2006).

10.2. PROYECCIÓN DE LA OFERTA ENERGÉTICA EN LA UNIÓN EUROPEA

El gráfico de la Figura 14.82 resume los principales rasgos de la oferta energética en el horizonte del año 2030 para la Unión Europea. Los atributos principales de esta proyección son los siguientes: se estima un descenso relativo de la contribución de la energía nuclear, de un 15% en 1998 a un 8% en el año 2030; un incremento relativo de las contribuciones del gas natural y de las energías renovables, mientras que se espera un estancamiento de las contribuciones relativas del petróleo y el carbón. La oferta energética global en la Unión Europea se calcula que habrá disminuido en el año 2030 un 15-18% respecto a los valores actuales.

A partir de los datos citados anteriormente, se puede constatar que tanto en el contexto europeo como en el español, la energía nuclear tiene un papel determinante en la producción de energía eléctrica, y que dicho papel, aunque decreciente, seguirá siendo importante en el futuro.

Sin embargo, para poder mantener y mejorar su competitividad en el mercado energético, es necesario trabajar en los siguientes aspectos, que constituyen las principales limitaciones de la energía nuclear:

- *Coste:* en mercados liberalizados, la energía nuclear no es hoy competitiva frente al gas y el carbón. Si se redujeran los costes de capital, de operación y de mantenimiento, y los plazos de construcción, podrían reducirse las diferencias. La imposición de tasas sobre emisiones de CO_2 pueden favorecer la energía nuclear.
- *Seguridad*: los diseños modernos pueden reducir los riesgos de accidentes graves, pero es esencial seguir investigando en nuevos avances que permitan mejorar la seguridad de los procesos de construcción, operación y gestión.
- *Residuos:* la gestión y eliminación de los residuos de alta actividad es uno de los mayores problemas a los que se enfrenta la industria nuclear. Esto está directamente relacionado con la tecnología usada en la concepción de la central (no sucede así en las centrales de 3.ª y 4.ª generación).
- *Proliferación militar:* se considera que la energía nuclear no debería expandirse a menos que el riesgo de proliferación derivado del ciclo comercial del combustible pueda reducirse suficientemente. El objetivo debería ser minimizar los riesgos de proliferación conexos a la operativa del ciclo comercial del combustible nuclear. La única parte positiva son los esfuerzos llevados a cabo por las grandes potencias nucleares para la conversión de las cargas atómicas en combustible nuclear para ser consumidas en las centrales de fisión.
- *Percepción social:* una parte importante de la población occidental sigue manteniendo una posición contraria a la energía nuclear, basada principalmente en el miedo a un accidente nuclear.

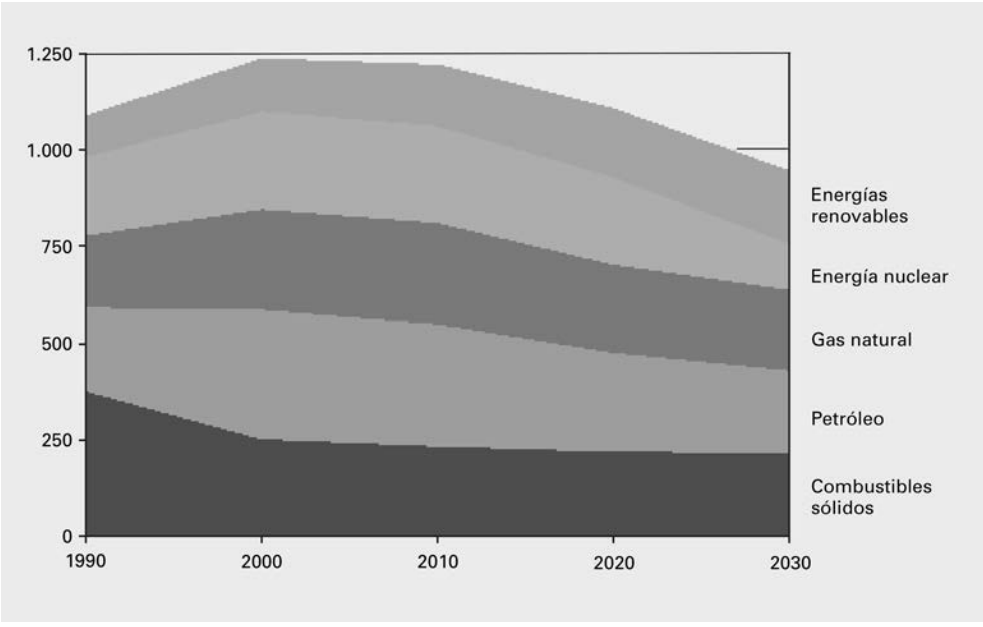


Figura 14.82. Evolución y tendencia futura de producción de las energías primarias en millones de tep. (Reproducido de *Annual Energy Outlook,* 2006)

10.3. RESIDUOS RADIOACTIVOS

En el Capítulo 7 de esta obra se ha desarrollado la clasificación de los residuos nucleares. En el presente apartado se hace hincapié en los de alta actividad, en particular a su gestión en depósitos.

10.3.1. Introducción al fenómeno de la radioactividad

La Humanidad ha convivido con la radiación y con los isótopos radioactivos desde la aparición de la vida en el planeta. Esta radiación, de origen natural, proviene de las sustancias radioactivas presentes en la corteza terrestre (alrededor del 20%), así como de procesos nucleares que tienen lugar en el espacio exterior (aproximadamente un 5%).

El propio organismo humano contiene isótopos radioactivos (un 15% del fondo radioactivo natural), principalmente de carbono y potasio. A este tipo de radioactividad hay que unir la radiación producida por el radón que se inhala al respirar (alrededor del 50%), procedente de la desintegración del radio y del torio, que se encuentran en formaciones geológicas (especialmente en granitos).

La primera evidencia sobre la existencia de la radioactividad tuvo lugar en 1896, cuando el científico francés Henri Becquerel descubrió, de forma casual, la capacidad de las sales de uranio de impresionar placas fotográficas. El descubrimiento dio lugar a un gran número de investigaciones, tanto en lo referente a la caracterización de otras sustancias radioactivas, como al estudio sobre la naturaleza de la radiación emitida. Tres décadas más tarde, en 1934, se llevó a cabo la obtención en el laboratorio del primer isótopo radioactivo artificial.

Desde entonces, el uso de la radioactividad ha proliferado de forma espectacular y, actualmente, además de su aplicación para la generación de energía eléctrica, los isótopos radioactivos, las radiaciones están presentes en el campo de la medicina, la agricultura, la industria y la investigación.

10.3.2. Definición y clasificación de los residuos radioactivos

Los residuos radiactivos son aquellos materiales que no tienen ningún uso declarado y contienen isótopos radioactivos por encima de un valor legalmente establecido. Se clasifican en dos grandes grupos:

1. Residuos de Baja y Media Actividad (RBMA). Se caracterizan por:
   - Ser emisores de radiación β y γ con periodos de semidesintegración inferiores a 30 años.
   - Actividad específica baja.
   - Contenido limitado de emisores α de vida larga.
   - Radiotoxicidad intermedia o baja.
2. Residuos de Alta Actividad (RAA). Se caracterizan por tener:
   - Periodos de semidesintegración superiores a 30 años.
   - Elevada actividad específica en emisores de vida corta.
   - Proporción considerable de emisores de radiación α y de vida larga.
   - Producción de calor.
   - Radiotoxicidad elevada.

Aproximadamente un 5% de los residuos radioactivos, corresponden al combustible gastado en las centrales nucleares.

10.3.3. Gestión de los residuos radioactivos

La gestión de ambos grupos de residuos requiere soluciones tecnológicas distintas. Para los RBMA su aislamiento y confinamiento debe asegurarse para periodos de aproximadamente 300 años, establecidos considerando que transcurridos 10 veces el periodo de semidesintegración, la actividad habrá prácticamente desaparecido. El diseño de instalaciones que aseguren estos periodos de confinamiento y aislamiento es una práctica industrial real y viable con los materiales tecnológicos actuales. Para estos residuos existen por tanto soluciones industriales probadas. En España se cuenta para su gestión con la instalación de almacenamiento de El Cabril (Córdoba), diseñada y construida por Enresa, cuya vista aérea muestra la Figura 14.83.

Todos los esfuerzos se centran actualmente en la gestión de los residuos radioactivos de alta actividad (RAA), que se encuentran almacenados temporalmente en piscinas o en instalaciones en seco en las centrales nucleares, a la espera de un emplazamiento definitivo. En el momento presente, se ha decidido llevar a cabo en España la construcción de un Almacenamiento Temporal Centralizado para dichos residuos. Ver Figura 14.84.

Sin embargo, los RAA requieren sistemas de gestión definitiva que aseguren su aislamiento y confina-

Figura 14.83. a) Modelo de instalación de almacenamiento de RBMA. b) Vista aérea de la instalación de almacenamiento de RMBA de El Cabril (Córdoba).

miento seguro por periodos de decenas o centenares de miles de años. El almacenamiento de estos residuos a gran profundidad en el interior de formaciones geológicas estables se denomina Almacenamiento Geológico Profundo (AGP) y es, hoy en día, la solución internacionalmente aceptada como más segura y viable para la gestión final de estos residuos.

En España los residuos de alta actividad están constituidos casi en su totalidad por el combustible gastado de las centrales nucleares, en forma de elementos combustibles y una pequeña cantidad de materiales procedentes del reproceso (vidrios, residuos tecnológicos, etc.).

10.3.4. Estrategias actuales de la gestión de residuos nucleares de alta actividad

La estrategia de gestión de los residuos nucleares de alta actividad en la actualidad está integrada por los siguientes pasos:

1. Almacenamiento en el lugar de producción. El combustible nuclear gastado proveniente de los reactores nucleares se almacena en piscinas instaladas en las mismas centrales nucleares por periodos de decenas de años con el fin de enfriar los elementos del combustible a temperaturas razonables. Una vez se ha conseguido dicha temperatura el combustible se puede almacenar en seco en almacenes temporales en la misma instalación (ATI's) a la espera de su destino.
2. Almacenamiento temporal centralizado (ATC). Los residuos de alta actividad provenientes del desmantelamiento de instalaciones nucleares, los elementos de combustible gastado y los vidrios provenientes del reprocesado se almacenan por un periodo de 60 a 100 años en un almacén centralizado a la espera de su destino final, que puede tener una etapa intermedia de valorización material y energética del residuo, o para su deposición final en el Almacenamiento Geológico Profundo (AGP), el cual se describirá a seguidamente.
3. Valorización material y energética de los residuos nucleares de alta actividad. En principio el alto contenido energético del combustible

Figura 14.84. Instalaciones de almacenamiento temporal. (ENRESA. Plan de I+D 1999-2003. Rev. 2000).

nuclear gastado se puede recuperar parcialmente a partir de operaciones de partición y reprocesado de los radioelementos contenidos en el CG, en particular los elementos transuránidos y en especial el plutonio. El plutonio y otros transuránidos son posteriormente mezclados en combustibles ricos en Pu que se utilizan en reactores del tipo MOX, con lo que el contenido energético del combustible gastado se reutiliza convenientemente al mismo tiempo que se minimiza la cantidad de radioactividad a depositar en el AGP. Actualmente se están desarrollando proyectos de investigación en Estados Unidos y en la Unión Europea relacionados con el aprovechamiento material del contenido de otros radionucleidos presentes en el combustible gastado y que a partir de su transmutación se pueden transformar en isótopos no radiactivos con lo que se minimizaría el contenido de radionucleidos del residuo final a depositar en el AGP.

A continuación se lleva a cabo una descripción somera de los principales procesos de partición y transmutación.

Partición. Originalmente el término partición se utilizaba para denominar los pasos que se utilizan el proceso de reprocesado conocido como Purex para la separación del uranio y del plutonio. Actualmente dicho término se utiliza más extensamente para describir aquellos procesos, principalmente basados en la extracción por disolventes, utilizados para separar los distintos radionucleidos que integran el combustible nuclear gastado. Hay una serie de procesos de partición que están siendo probados en distintos países. Así en los Estados Unidos se conoce como TRUEX, en Japón a dicho proyecto de investigación se le conoce como Omega, los franceses lo denominan SPIN y Actinex. La separación de los distintos actínidos y lantánidos se dificulta por el hecho de que sus propiedades químicas y físicas son muy parecidas, lo que precisa de métodos de separación muy sofisticados. Estos proyectos de investigación durarán algunas décadas antes de que puedan aportar algún resultado práctico.

Transmutación. Los productos de fisión más ligeros, ^{90}Sr y ^{137}Cs pueden transformarse en isótopos de menor vida media o incluso en isótopos estables a partir del bombardeo por partículas cargadas e irradiación neutrónica. Esto se puede conseguir de forma razonable utilizando aceleradores de neutrones de alta energía y rendimiento. La optimización de dicho proceso podría minimizar la cantidad de radionucleidos a depositar en el AGP hasta un 90%. Sin embargo el desarrollo de dicha tecnología a escala industrial está a unos cien años vista.

10.4. ALMACENAMIENTO GEOLÓGICO PROFUNDO (AGP)

En la gestión de residuos radioactivos se deben combinar soluciones técnicas, a veces complejas, con aspectos económicos, medioambientales y sociopolíticos. La combinación de todos estos factores no es una tarea fácil, como así demuestran las investigaciones sobre las diferentes opciones de disposición llevadas a cabo desde 1957, algunas de las cuales han sido descartadas definitivamente.

La disposición de los residuos en sedimentos del subsuelo oceánico fue una de las opciones estudiadas en profundidad durante la década de los años 1980. La viabilidad y seguridad de este tipo de disposición fueron cuidadosamente evaluadas, pero tuvieron que hacer frente a dificultades legales de ámbito internacional.

El almacenamiento de los residuos en fosas marinas, situadas en la unión de las placas tectónicas, y el envío de los residuos al espacio fueron otras de las opciones contempladas. Sin embargo, se descartaron más tarde no sólo por motivos económicos, sino también debido al grave riesgo que conllevan ambas propuestas, asociado a la inestabilidad geológica de la zona y a un posible fallo técnico durante el lanzamiento, respectivamente.

En los últimos años se está estudiando la eliminación de residuos radioactivos mediante la transmutación de los isótopos radioactivos más peligrosos en otros inocuos, de vida más corta o más fáciles de gestionar. En este sentido, la utilización de esta técnica permitirá disminuir el contenido en radionucleidos de vida larga, pero no en su eliminación total y por tanto, no evitará la necesidad de una estrategia de aislamiento de los residuos a largo plazo.

De momento, la solución que internacionalmente está aceptada como más segura y viable para la gestión final de los RAA es el almacenamiento geológico profundo (AGP), que consiste en la construcción de un almacén subterráneo (entre 400 y 1.000 metros) para aislar los residuos de la biosfera mediante una serie de barreras naturales y artificiales.

Hoy en día la única instalación de almacenamiento geológico profundo en operación es la *Waste*

Figura 14.85. Vista general de la instalación de almacenamiento geológico profundo (WIPP) en Carlsband, Nuevo México, EE UU.

Isolation Pilot Plant (WIPP) en Nuevo México (Estados Unidos) para residuos militares de alta actividad, ver foto aérea en la Figura 14.85. Sin embargo, existen diversos países con programas muy avanzados que iniciarán, en un breve periodo de tiempo, la construcción de instalaciones de AGP, como son los casos de Finlandia y Suecia.

10.4.1. Sistema multibarrera

El almacenamiento geológico profundo (AGP) se fundamenta, como simboliza la Figura 14.86, en la capacidad de aislamiento y confinamiento de las formaciones geológicas, siempre que éstas reúnan unas determinadas características de estabilidad, potencia (espesor), ausencia de vías preferentes de migración y capacidad de retención. Esta capacidad de confinamiento y aislamiento se complementa con la colocación de un sistema de barreras de ingeniería en torno a los RAA.

A este tipo de sistema de confinamiento se le denomina sistema multibarrera, que consiste exactamente en interponer una serie de barreras, artificiales y naturales, entre el residuo y la biosfera, que aseguren que el tiempo de tránsito hasta la biosfera de cualquier radionucleido almacenado que pudiera liberarse, sea tan largo que de alcanzarla, su actividad habrá decaído lo suficiente como para ni modificar los rangos del fondo radiactivo natural, ni los rangos aceptados para las personas. Este funcionamiento debe asegurarse bajo cualquier hipótesis de funcionamiento actual o futuro.

Cada una de las barreras va a imponer unas condiciones de aislamiento y retardo específicas, siendo su conjunto un sistema redundante cuyo resultado final será la ausencia de impacto no deseable tanto para el hombre como para el medio ambiente.

Las barreras artificiales se diseñan, construyen y colocan considerando el diseño del repositorio por el que se haya optado, y tienen en consideración las características y la conexión con el sistema de barreras naturales.

Las barreras naturales no han sido construidas por el hombre pero sí seleccionadas y caracterizadas de forma que reúnan los requisitos funcionales necesarios para que, en conjunción con las barreras de ingeniería artificiales, confieran al sistema la seguridad adecuada. Las barreras naturales son las responsables a más largo plazo de la seguridad del sistema, aún considerando la degradación de las barreras de ingeniería y el acontecimiento de eventos no deseables, pero sí predecibles.

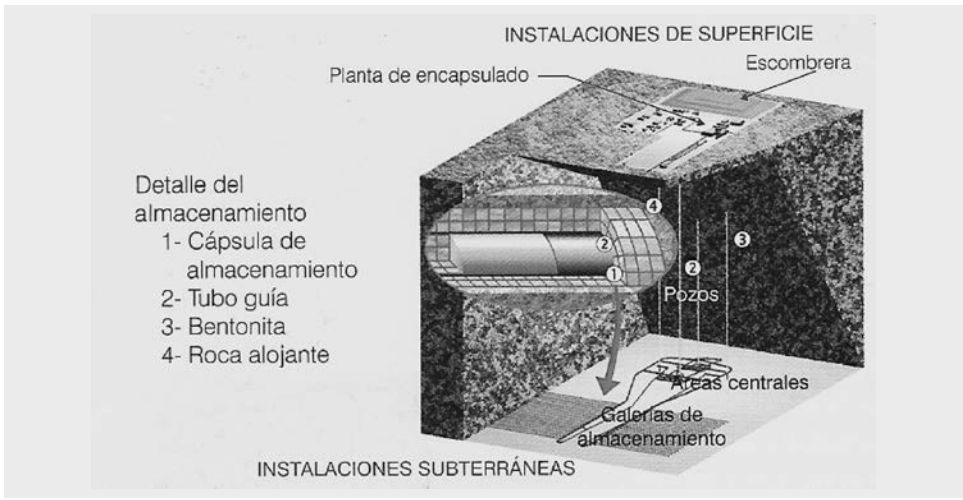


Figura 14.86. Almacenamiento en formación geológica profunda de residuos de alta actividad (RAA).

Los componentes de las barreras artificiales o de ingeniería son:

- La propia forma química del residuo.
- Las cápsulas metálicas de almacenamiento.
- Los materiales de relleno y sellado.

Los componentes de las barreras naturales son:

- La geosfera. Formaciones geológicas donde se ubica el repositorio y las aguas y gases que contienen.
- La biosfera. Conjunto de ecosistemas (suelos, aguas, seres vivos, etc.) que recibirían el impacto del repositorio.

Los requisitos funcionales de las barreras de ingeniería son: aislamiento del repositorio del agua subterránea, protección mecánica, retardo de la salida de radionucleidos y disipación del calor. Su diseño deberá tener en cuenta tanto las características de la formación geológica alojante del repositorio como las condiciones de presión, temperatura y radiación a que estarán sometidas en las distintas fases del funcionamiento a largo plazo de la instalación.

La forma química del residuo, bien como elementos combustibles o como residuos vitrificados constituye la primera barrera. Es de tipo fisicoquímico y está fundamentada en la resistencia a la corrosión e insolubilidad en las condiciones reductoras existentes en el repositorio (condiciones debidas al ínfimo contacto del repositorio con la atmósfera). La solubilidad de los materiales que contienen los radionucleidos (UO_2 o vidrio) es tan baja que son necesarios millones de años para completar su disolución dado el pequeño volumen de agua con el que podrían estar en contacto si el emplazamiento está bien seleccionado y las barreras bien diseñadas y construidas.

Las cápsulas metálicas, como muestra la Figura 14.87, sirven principalmente para albergar los RAA. Deben ser resistentes a la corrosión para retardar la llegada de agua al combustible, durables para proteger mecánicamente a los elementos combustibles, y de materiales que disipen bien el calor y sean estables frente al calor y la radiación. Pueden contener materiales de relleno que actúen como barrera fisicoquímica adicional inmovilizando o reteniendo radionucleidos liberados. Así mismo los pro-

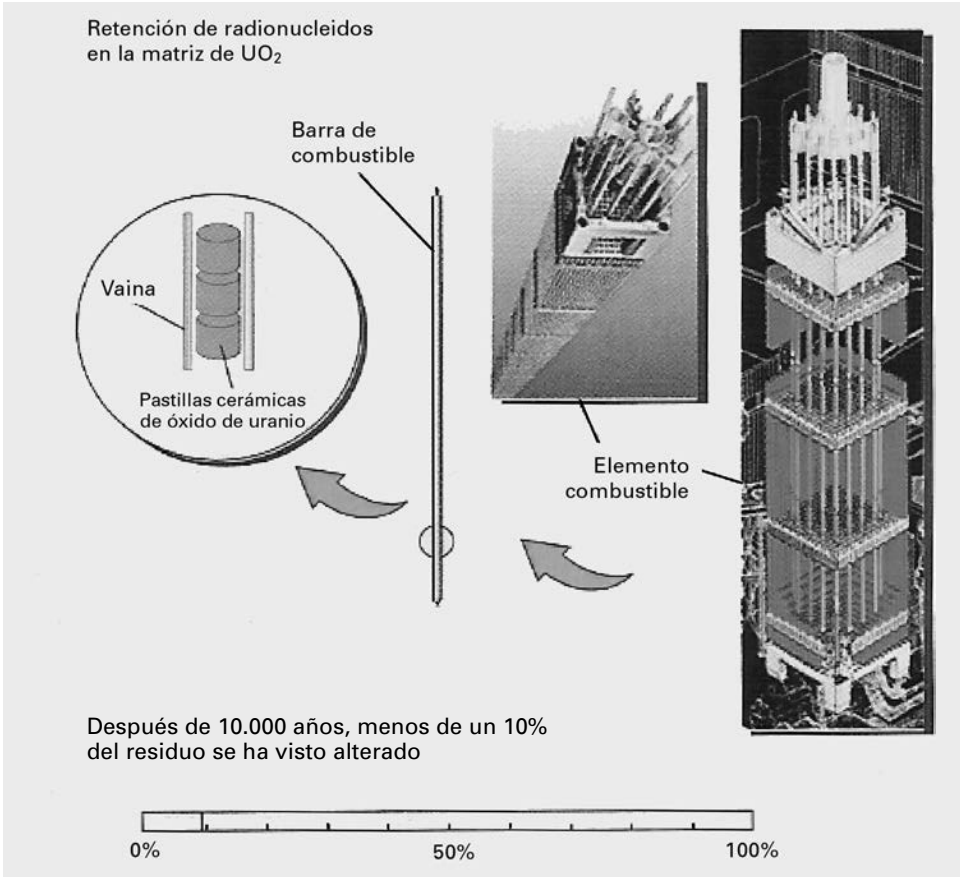


Figura 14.87. Almacenamiento en cápsulas de residuos de alta actividad.

Figura 14.88. Estructura de las cápsulas para el almacenamiento de los RAA.

ductos de corrosión de la cápsula (oxihidróxidos de hierro), en el caso de los aceros, tienen una gran capacidad de porción o retención de radionucleidos, y actúan también manteniendo las condiciones reductoras del medio.

Los materiales del grupo de los aceros son mecánicamente muy resistentes y su comportamiento frente a la corrosión es bueno y cuantificable. ENRESA, en su concepto de referencia, utiliza como material para las cápsulas acero al carbono, asignándole una integridad mínima de 1.000 años en los análisis de seguridad.

Como material de relleno y sellado se utiliza la arcilla compactada. Ésta se colocaría rodeando a las cápsulas y en contacto con la formación geológica. El material arcilloso seleccionado para fabricar las barreras de arcilla compactada es la denominada bentonita. Su selección obedece a su baja permeabilidad (minimiza la llegada del agua), su conductividad térmica (disipa el calor), su capacidad de hinchamiento (sellado de vías de acceso de agua), su elevada superficie específica (retención de radionucleidos y conservación de la química del agua dentro de un cierto rango), alta plasticidad (protección mecánica) y capacidad de succión (sellado del repositorio).

El papel que juega la barrera geológica en el repositorio es clave, dado que por un lado va a incidir en el funcionamiento del resto de las barreras y por otro va a suministrar un elemento definitivo de seguridad a largo plazo.

Los requisitos funcionales de las barreras geológicas son: proteger las barreras de ingeniería, minimizar el volumen del agua en el repositorio, retardar o inmovilizar la salida de radionucleidos, proteger al repositorio frente a la intrusión humana. Para cumplir estos requisitos funcionales las formaciones geológicas alojantes del repositorio deben tener, como muestra la Figura 14.89:

- Potencia, profundidad y extensión suficiente para aislar al repositorio de procesos naturales o actividades humanas no deseadas.
- Estabilidad tectónica (carencia de fallas activas) y baja sismicidad.
- Poca complejidad estructural (simplicidad).

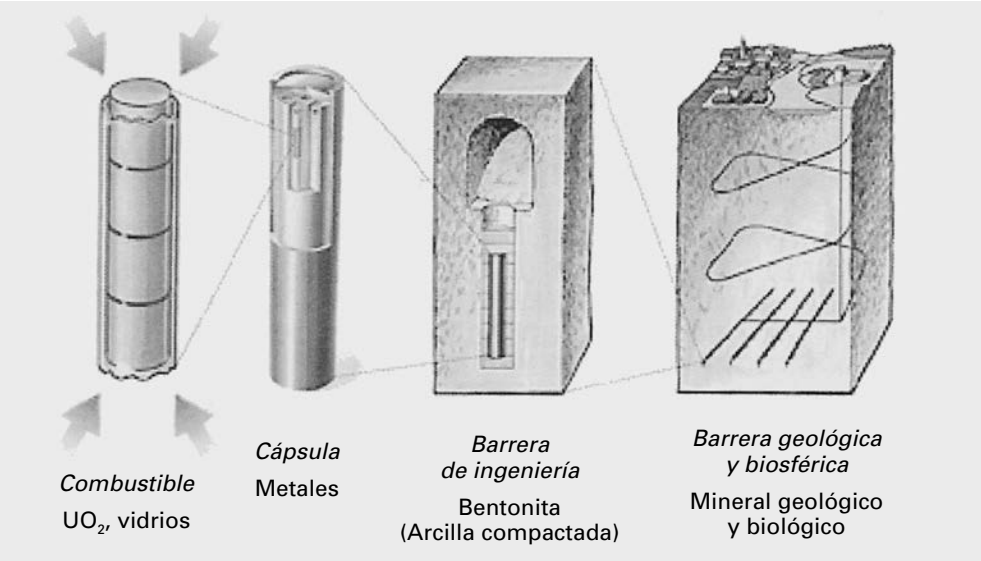


Figura 14.89. Componentes y barreras de un almacenamiento geológico profundo. Reproducido de [SKB-SR97].

- Homogeneidad litológica.
- Baja permeabilidad y gradiente hidráulico.
- Condiciones adecuadas de retención de radionucleidos (capacidad reductora y de retardo, inmovilización).
- Posibilidad de representar o simular su funcionamiento mediante modelos numéricos.

El abanico de litologías que cumplen estos requisitos es muy amplio, si bien las más extendidas son: granitos, arcillas y sales.

10.4.2. Funcionamiento a largo plazo de un AGP

A continuación se describe de forma resumida e idealizada el funcionamiento de un repositorio, considerando el viaje de una molécula de agua que, procedente del medio geológico, alcanzará el repositorio, en distintas etapas de su evolución y se incorporará posteriormente otra vez al medio geológico y finalmente a la biosfera. Para ilustrar este ejemplo se ha considerado un medio granítico.

Etapa 0: *Estado previo inicial del emplazamiento*

Antes de construir el repositorio habrá que hacer un estudio del terreno. El emplazamiento tendrá un funcionamiento hidrogeológico en el que el agua se moverá preferentemente por las fracturas y en mucha menor medida por la matriz de la roca. El agua que existe en el medio geológico será el resultado de la mezcla del agua de recarga inicial, agua de lluvia muy diluida (conteniendo oxígeno atmosférico), con el agua intersticial del suelo. A medida que vaya profundizando en el medio geológico, irá cediendo oxígeno por su reacción con las rocas que atraviesa, hasta perder su capacidad de oxidación. Además, se irá saturando en sales y CO_2. Cuando alcance la zona donde se ubicaría el repositorio, transcurridos miles de años, tendrá una composición de tipo bicarbonatada sódica, consecuencia del equilibrio con los minerales del granito y los que rellenan las fisuras y fracturas. El emplazamiento tendrá una temperatura entre 20 y 30 °C, y apenas habrá oxígeno, es decir, el agua será de carácter reductor.

Bibliografía

A. ANDRÉS, Caracterización e Inertización de Residuos Industriales: Polvo de acería. Tesis Doctoral, Dpto. Ingeniería Química, Universidad del País Vasco, 1992.

A. J. DUTRA, P. R. PAIVA, L. M. TAVARES. Alkaline leaching of zinc from electric arc furnace steel dust. *Materials Engineering*, 19, pp. 478-485, 2006.

AEMA. 2004. Señales medioambientales de la AEMA 2004. Una actualización de la Agencia Europea de Medio Ambiente sobre temas específicos. 36 p.

AEMA. 2005. Progress in management of contaminated sites (CSI 015)-May 2005 Assessment.

AIMME. IMPIVA. *Tecnologías de vertido cero en la industria de tratamiento de superfícies*. Generalitat Valenciana. Valencia, 1998.

ALMANSA, M. 2000. *Valoración del comportamiento de residuos orgánicos mediante incubación y aplicación en una rotación de cultivos extensivos.* PFC-ESAB-Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Agrària de Lleida.

Annual Energy Outlook 2004, with projections to 2025 (2004). Energy Information Administration (EIA). Report.

ARC. 2006. Procés de gestió dels sòls contaminats a Catalunya. Disponible en http://www.arc-cat.net/ca/altres/sols/ngr.html

Befesa Zinc Aser, Asúa-Erandio (Vizcaya). Información confidencial, 2006.

C. ROEDERER, L. Gourtsoyannis, EC Coordinated Study «Steel-Environment», DG XII-EUR 16955 EN, 1996.

CAIRNEY, T. 1995. The Re-use of contaminated land. A handbook of risk assessment. Wiley. Chichester. 219 p.

CASTILLA, E. 2003. Usos y coberturas vegetales del suelo en Andalucía. *Revista Medio Ambiente*. Junta de Andalucía. N.º 42.

CERA, E. (1996) «Estudis termodinàmics i cinètics de dissolució de fases naturals d'urani representatives d'un procés d'alteració oxidativa de l'òxid d'urani (IV). Analogia amb el comportament i amb l'evolució a llarg terme d'un repositori de residus radioactius». Tesis Doctoral. Universitat Autònoma de Barcelona.

DPTOP. 2002. *Anuari estadístic*. Generalitat de Catalunya.

DPTOP. 2004. *Anuari estadístic*. Generalitat de Catalunya.

ELIAS, X. Valorización energética de aceites usados. *Revista Residuos* (abril 2003).

ELIAS, X. *El vehículo como fuente de residuos. Los residuos como fuente de energía.* 1.er Forum de l'automobil i medi ambient (Girona, diciembre 1998).

ENRESA (1997). Terceras Jornadas de I+D y tecnologías de gestión de residuos radiactivos.

ENRESA, ASTUDILLO, J. (2001) *El almacenamiento geológico profundo de los residuos radiactivos de alta actividad. Principios básicos y tecnología*. Editorial Enresa.

EPA. 1996. Technology alternatives for the remediation of soils contaminated with arsenic, cadmium, chromium, mercury, and lead. *Engineering Bulletin.* EPA/540/S-97/500. Cincinnati, OH.

EPA. 2006. Treatment technologies screening matrix. Disponible en http://www.frtr.gov/matrix2/section3/table3_2.html

FAO. 2000. *Evaluación de la contaminación del suelo. Manual de referencia*. Colección FAO: Eliminación de Plaguicidas, n.º 8.

FYFE, W. F., BABUSKA, V., PRICE, N. J., SCHMID, E., TSANG, C.F., UYEDA, S. y VELDE, B. (1984) The geology of nuclear waste disposal. *Nature.* Vol. 310, pp. 537-540.

G. Néstor, G.E. Borja, The situation of EAF dust in Europe and the upgrading of the Waelz process. In: Global Symposium on Recycling, *Waste Treatment and Clean Technology*, Rewas, 99, vol. 2, pp. 1511-1520.

HOLLISTER, C. D. y NADIS, S. (1998) Burial of radioactive waste under the seabed. *Scientific American*. Vol. 278, pp. 60-65.

HÜNNEMEYER, J. A., DE CAMINO, R. y MÜLLER, S. 1997. *Análisis del desarrollo sostenible en centroamérica: Indicadores para la agricultura y los recursos naturales.* IICA/GTZ. San José, Costa Rica.

IPPC (Integrated Pollution Prevention and Control). Best Available Techniques Reference Document on the Production of Iron and Steel, December 2001, http://eippcb.jrc.es

ITRC (Interstate Technology & Regulatory Council). 2006. *Property Revitalization-Lessons.*

J. G. MACHADO, F. A. BREHM, C. A. MENDES, C. A. SANTOS. Chemical, physical, structural and morphological characterization of the electric arc furnace dust. *Journal of Hazardous Materials*, B135, pp. 311-318, 2006.

Learned from BRAC and Brownfields. BRNFLD-2. Washington, D.C.: Interstate Technology & Regulatory Council, Brownfields Team. Disponible en http://www.itrcweb.org.

MCMENAMIN, T. (1997). Management and disposal of radioactive waste (Fourth European Conference on). EUR 17543 EN.

N. LECLERC, E. MEUX, J. M. LECUIRE, Hydrometallurgical extraction of zinc from zinc ferrites. *Hydrometallurgy*, 175-183, 2003.

OSE (Observatorio de la Sostenibilidad en España). 2006. Informe sobre cambios de ocupación del suelo en España: implicaciones para la Sostenibilidad.

PÉREZ, I. (2000) Estudios de disolución de análogos naturales del combustible nuclear gastado y de fases de U(VI)-silicio representativas de un proceso de alteración oxidativa. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya.

R. BARNA, H. BAE, J. MÉHU, H. SLOOT, P. MOSZKOWICZ, C. DESNOYERS. Assessment of chemical sensitivity of Waelz slag, *Waste Management*, 20, pp.115-124, 2000.

R. SOLOZABAL, A. ARTECHE, N. KANARI, I. GABALLAH, A. UGARTE. Recovery in situ of EAFD Metals by means of Process INTECT in the laboratory and pilot plant experimentations, *Afinidad* LXII, 519, Sep-Oct 2005.

TESTA, S. M. 1997. *The reuse and recycling of contaminated soil*. Lewis Publishers. Boca Raton.

VAN LYNDEN, G. W. J. 1995. European soil resources. Current status of soil degradation, causes, impacts and need for action. Council of Europe Press. *Nature and Environment*, n.º 71, Strasburg, France.

ANEXO.
Diccionario de términos ambientales

Xavier Elias

Nota: Es posible que el lector no encuentre el significado habitual de la palabra buscada. Esto se debe a que el autor, siempre que ha sido posible, ha empleado el término usado en su acepción ambiental.

Abbe, propiedad de: Es una medida de la dispersión cromática de la luz en un material, indicando la variación del índice refractivo con la longitud de onda de la luz incidente.

Abiótico: Dicho del medio en el cual los organismos vivos no pueden existir.

Abisal: Referente a las profundidades oceánicas.

Ablandamiento: Tratamiento a la que se someten las aguas para reducir la cantidad de carbonatos.

Abono: Sustancia orgánica o mineral que contiene nutrientes necesarios para el crecimiento de los vegetales y que se utiliza para aumentar la fertilidad de los suelos. El uso abusivo de abonos químicos puede ser una causa de contaminación del medio hídrico subterráneo y los suelos, al producir, en función de la cantidad de abono, un incremento significativo de la lixiviación de elementos químicos. Esta lixiviación puede comportar la alteración de la composición química natural de las aguas y el suelo.

Abrasivo: Material que se utiliza para desgastar y pulir superficies de cuerpos duros por fricción. Abrasivos son el esmeril, la arena y la pumita.

Absorción: Operación básica en química por la que se separa uno o más componentes de una mezcla gaseosa por medio de un líquido en el que son solubles. Proceso por el cual una sustancia se integra en otra sustancia a escala molecular y se difunde homogéneamente.

Absorción acústica: Se llama así a la relación existente entre la energía sonora incidente y la energía absorbida. El coeficiente de absorción, que depende de la naturaleza de cada material, varía con la frecuencia del sonido incidente.

Absorbente acústico: Son materiales utilizandos en el acondicionamiento acústico de los recintos por su capacidad de aboserber la mayor parte de la energía que reciben. Por tanto, al reflejar un porcentaje muy pequeño del sonido incidente, se evitan reflexiones indeseadas, que pueden perjudicar la acústica del local, al introducir distorsiones.

ACA (Agencia Catalana del Agua): Es una entidad pública, adcrita al Departament de Medi Ambient i Habitatge de la Generalitat de Cataluña, con plenas competencias en el ciclo integral del agua en las cuencas internas de Cataluña, en las cuencas intercomunitarias la Agencia tiene competencias compartidas con la Confederación Hidrográfica del Ebro para el saneamiento, aprovechamiento, intervención en el dominio público y canalización.

Acantilado: Forma erosiva costera que resulta de la acción combinada de procesos mecánicos (oleaje), químicos (agua, temperaturas) y biológicos (plantas, animales) sobre un relieve abrupto. Los acantilados son formas juveniles de la erosión marina, normalmente en retroceso.

Ácaro: Microorganismos muy abundantes imprescindibles para el reciclaje de la materia orgánica muerta.

Aceite de alcanfor: Líquido combustible, se usa como aceite de motor.

Aceite de corte: Aceite que se utiliza para refrigerar y lubricar la herramienta de corte y la pieza que se trabaja en una máquina herramienta.

Aceite de linaza: Líquido inflamable y venenoso que se emplea para tapar la porosidad de la madera y la cerámicas.

Aceite diatérmico: Tipo de aceite que se usa como transportador de calor, también denominado aceite térmico.

Aceites esenciales: Sustancias volátiles naturales producidas por las plantas de las que pueden extraerse por destilación o extracción con disolventes. Se emplean en la industria cosmética y en aromaterapia.

Aceite usado: Aceite con base mineral o vegetal que se ha vuelto inadecuado para el uso que tenía inicialmente.

Acelerógrafo: Centro de recogida de datos en tiempo real, equipado con sensores más sencillos que los de la es-

tación sísmica, que envían la información obtenida a la estación sísmica más próxima.

Acetileno: CH≡CH. Hidrocarburo no saturado del grupo de los alkinos, también llamado etino.

Acetona: También denominada propanona (según la nomenclatura IUPAC). Es un compuesto sintético que también se encuentra naturalmente en el medio ambiente. Es un líquido incoloro, de olor y sabor fáciles de distinguir. Se evapora fácilmente, es inflamable y es soluble en agua. Su fórmula química general es $CH_3(CO)CH_3$. La acetona se usa en la fabricación de plásticos, fibras, medicamentos y otros productos químicos. También se usa para disolver otras sustancias químicas.

Aceros: Son aleaciones de hierro-carbono, con porcentajes de carbono variables entre 0,008 y 2,14%. Se distinguen de las fundiciones, también aleaciones de hierro y carbono, en que las fundiciones tienen una proporción de carbono que puede variar entre 2,14% y 6,70%, aunque la mayoría de las fundiciones comerciales no superan el 4,5% de carbono.

Acero galvanizado: Es un acero recubierto con zinc para protegerlo de la corrosión.

Acidificación: Introducción de un ácido en el medio acuoso.

Ácido gálico: Ácido fenólico.

Ácido hipocloroso: Es el más débil de la serie de los oxiácidos del cloro. Las sales sódica y potásica de este ácido se usan frecuentemente como desinfectantes o como blanqueantes en la industria de la celulosa, por su alto poder oxidante. Fórmula HClO.

Acidogénesis: Fase de la fermentación anaerobia donde los monómeros se transforman en ácidos grasos.

Aclareo: Labor agrícola consistente en la selección por eliminación de plantones.

Acreción costera: Crecimiento de formaciones sedimentarias litorales por yuxtaposición de los aportes.

Actinomicetos: Microorganismos conformados por gram positivos, unicelulares, en forma de bacilos y microorganismos filamentosos. Comprenden al grupo Corineforme y pertenecen al orden de los Actinomicetales.

Actividad clasificada: Actividad que se considera molesta, insalubre, nociva o peligrosa en la obtención de la licencia municipal de actividad.

Acuacultura: Conjunto de actuaciones, básicamente de carácter urbano, tendentes a sensibilizar a la población del excesivo consumo de agua.

Acuicultura: Conjunto de técnicas para criar, reproducir y cultivar especies acuáticas de animales y vegetales con una finalidad alimentaria, comercial o de repoblación.

Acuífero: Formación geológica porosa donde se acumula y circula agua subterránea.

Acutómetro objetivo: Sonómetro en el que el sonido cuya intensidad se desea medir actúa sobre un micrófono conectado a un amplificador y un detector, indicando este último el nivel de ruido en la escala de fones. El aparato se calibra previamente, mediante intensidades conocidas de la nota que se toma como referencia, o sea la de 1.000 ciclos por segundo, y se incorporan al amplificador líneas artificiales adecuadas y un circuito integrador para imitar las propiedades que se deseen del oído en la apreciación del sonido.

ACR: Asociación de Ciudades por el Reciclaje.

ACV: Véase *Ciclo de vida*.

Adaptación biótica: Ámbito que supone la modificación en las costumbres motivado por la competición con otras plantas.

Adiabático: En termodinámica se designa como proceso adiabático a aquel en el cual el sistema (generalmente, un fluido que realiza un trabajo) no intercambia calor con su entorno. Un proceso adiabático que es además reversible se conoce como proceso isentrópico. El extremo opuesto, en el que tiene lugar la máxima transferencia de calor, causando que la temperatura permanezca constante, se denomina como proceso isotérmico. El término adiabático hace referencia a elementos que impiden la transferencia de calor con el entorno. Una pared aislada se aproxima bastante a un límite adiabático. Otro ejemplo es la temperatura adiabática de llama, que es la temperatura que podría alcanzar una llama si no hubiera pérdida de calor hacia el entorno.

Adipatos: Éteres de ácidos orgánicos usados generalmente como plastificantes.

Aditivo: Término general empleado para sustancias que mezcladas con otras producen algún resultado especial.

Aditivos antidetonantes: Compuestos que se añaden a los carburantes para evitar la autoignición en máquinas de combustión interna. El que más se usa es el tetraetilo de plomo. Ahora prohibidos en la UE.

ADN: Es la abreviatura del ácido desoxirribonucleico (en inglés: Deoxyribonucleic Acid). Constituye el material genético de los organismos vivos. Es el componente químico de los cromosomas y el material de los que los genes están formados. Fue identificado en 1868 por Friedrich Miescher, biólogo suizo.

Adobado: Etapa del curtido de pieles donde se producen uniones transversales entre las fibras de la piel de colágeno (–COO) y el curtiente, lo que estabiliza su estructura y le confiere la durabilidad necesaria. El adobado puede ser mineral o vegetal.

Adobe: Es un material formado por una masa de arcilla y algún aditivo, secada al sol y al aire, caracterizándose por ser un material que se emplea sin cocción previa. Es un antiquísimo material de construcción que se encuentra en muchas regiones. Funciona muy bien en regiones de clima seco.

Adsorción: Fuerzas en superficie (Van der Waals) que provocan una acumulación o incorporación de una materia o sustancia en la superficie de un cuerpo sólido. Se utiliza este proceso en numerosos métodos de con-

trol de contaminación. Proceso por el cual una sustancia se adhiere a la superficie de otra a causa de las fuerzas residuales físicas y/o químicas existentes en las superficies de sólidos y líquidos.

Adsorbato: Sustancia que es adsorbida, que en el caso de un soluto es denominada tensoactiva.

Advección: Transporte de contaminantes por corrientes de aire y/o de agua.

Aereación: Inyección de aire (o aire enriquecido) en un tanque de agua residual.

Aerobiosis: Forma de vida de los aerobios, los cuales para mantener la actividad metabólica obtienen la energía a partir de procesos de oxidación en que el oxígeno molecular ha de intervenir como oxidante final.

Aerogenerador: Equipo equipado con palas que cuando son accionadas por el viento giran y transmiten la fuerza, a través de un multiplicador, a un alternador que lo transforma en energía eléctrica. Los hay en tierra y «*off-shore*», es decir en el mar.

Aerosol: Suspensión de partículas líquidas o sólidas en un medio gaseoso con una velocidad de caída insignificante. También es una palabra utilizada genéricamente para referirse a los *pulverizadores* que es un elemento compuesto de un recipiente donde se almacena un líquido, que tiene un dispositivo en la parte superior que permite expulsar ese líquido en forma vaporizada. El mecanismo de expulsión puede ser activado manualmente o mediante un gas.

AFC: Siglas inglesas de Pila de Combustible Alcalina.

Afluente: Corriente de agua que desemboca en otra más importante por la longitud, el caudal, la superficie de la cuenca y los aluviones transportados.

Aforo: Medida del caudal de un curso de agua en un punto y durante un periodo determinado.

Aftosa, fiebre: Enfermedad infecciosa y contagiosa producida por un virus, que causa estragos entre los animales.

Agar: tipo de algas rojas de alto poder gelificante. Polisacárido extraído de ciertas algas.

Agenda 21: La agenda 21 es un conjunto de principios y declaraciones, suscritos por la mayoría de los gobiernos reunidos en la Cumbre de Río de Janeiro (Brasil) 1992, tendentes a conseguir un desarrollo más sostenible.

Agente tensoactivo: Compuesto, generalmente orgánico, que presenta la propiedad de disminuir la tensión superficial del agua y la tensión intersticial de los sistemas líquidos insolubles entre sí.

AGF (Flotación de gas anóxica): Sistema empleado para la depuración de aguas residuales a base de inyección de un gas.

Aglomeración: Proceso en el cual se compacta la materia sólida para el transporte o posterior operación.

Agregado: término general para denominar cualquier mezcla de partículas como son la arena, grava, piedra triturada, o carbonilla usados en las formulaciones del cemento Portland, construcción de carreteras, pavimentados, cría de animales, filtros de goteo, horticultura, etc.

Agregados ligeros: Productos de baja densidad constituidos a base de arcilla con un compuesto orgánico. Por extensión son materiales naturales livianos como: perlita, vermiculita, etc. Se usan en la formulación de hormigones y yeso.

Agricultura biodinámica: Véase *Agricultura ecológica*.

Agricultura biológica: Véase agricultura ecológica.

Agricultura ecológica: Producción agrícola que se lleva a cabo sin productos químicos de síntesis; se utilizan abonos orgánicos, agricultura de policultivos, abono verde, conserva setos y bosques próximos como protectores, mantiene las variedades locales de cultivo, etc. El producto final es más nutritivo y menos contaminado. Surgió a partir de los años 60 como respuesta a la agricultura industrial. La denominación genérica «Agricultura Ecológica», apareció en la Orden Ministerial 4 de Octubre de 1989, está gestionada por el Consejo Regulador de la Agricultura Ecológica (CRAE), dependiente del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. La que, además de ser sostenible, evita el empleo de agroquímicos. Utiliza rotaciones de cultivos, con variedades adaptadas.

Agricultura sostenible: La que utiliza el máximo de recursos naturales e intenta favorecer los ciclos biológicos en el agrosistema, trabajando en un ciclo cerrado por lo que hace referencia a los nutrientes y materia orgánica.

Agroquímica: Parte de la química que estudia los procesos relacionados con la agricultura.

Agua bicarbonatada: Agua con una concentración mayor de 600 mg/l de bicarbonatos.

Agua blanda: Agua sometida a un proceso de reducción de dureza.

Agua cálcica: Agua con una concentración mayor de 150 mg/l de calcio.

Agua clorada: Agua a la cual se le ha adicionado cloro o un producto capaz de generarlo.

Agua clorurada: Agua con una concentración mayor de 200 mg/l de cloruros.

Agua de alimentación: El agua que se ha depurado previamente para quitarle el aire (en particular el oxígeno) e impurezas, y que se suministra a una caldera para ser vaporizada.

Agua de Javel: o lejía, solución de hipoclorito sódico.

Agua desionizada: Agua resultante de hacer circular el agua a través de resinas de intercambio catiónicas y aniónicas.

Agua dura: Agua que contiene en disolución cantidades importantes de calcio y magnesio, normalmente en forma de cloruro, sulfato o bicarbonato. Si es esta última se denomina temporal ya que se elimina por ebullición.

Agua fétida: En muchos géiseres el mal olor es provocado por las bacterias anaerobias que resisten más de 100 ℃.

Agua flourada: Agua con una concentración mayor de 1 mg/l de fluor.

Agua ligera: Agua normal, denominado así para distinguirla del agua pesada.

Agua oxigenada: véase peróxido de hidrógeno.

Agua pesada: Aquella que el oxígeno se halla combinado con el deuterio (isótopo del hidrógeno).

Agua supercrítica: Agua a una presión superior a 218 atm y a una temperatura superior a 370 ℃, utilizada para eliminar la carga contaminante por oxidación húmeda.

Aguas de esparcimiento: Aguas destinadas a la práctica de deportes acuáticos como la pesca y el baño.

Aguas fecales: Aguas residuales procedentes de servicios sanitarios cuya contaminación es, básicamente, de tipo microbiológico y se origina por la presencia de excrementos.

Aguas madres: Soluciones, generalmente acuosas, obtenidas en la etapa inicial de determinados procesos de separación sólidos-líquidos, como en la filtración, centrifugación, etc.

Aguas marinas: Regidas por la Ley de Costas. Se entiende según esta ley: «hasta donde alcancen las olas en los mayores temporales conocidos, o cuando lo supere, el de la línea de pleamar máxima viva equinoccial: Además normativa constituida por O. de 27.5.67, O. de 29.4.77, relativa al vertido al mar de aguas residuales a través de emisarios y R.D. 258/89 sobre vertidos de sustancias peligrosas desde tierra al mar, en aplicación de la directiva 75/464.

Aguas negras: Véase *Aguas fecales*.

Aguas protegidas: Aquellas a las que se imponen limitaciones por los motivos que sea (por ejemplo, para mantener el nivel de agua subterránea o para proteger la vida acuática).

Aguas residuales urbanas: Aguas residuales domésticas o mezcladas con aguas residuales industriales o con agua pluvial.

Aguas residuales, tratamiento avanzado: Véase *Tratamiento terciario*.

Aguas subterráneas: Aguas de fondo. Aguas que se encuentran bajo la superficie del suelo en la zona de saturación y en contacto directo con el suelo o el subsuelo. Agua llegada al subsuelo por infiltración o liberada de magmas rocosos ascendentes que llena los espacios vacíos de la tierra o de la roca viva. Hay capas que conducen el agua de fondo y otras inferiores impermeables que la almacenan. El agua de fondo más cercana a la superficie, o a nivel freático, se ve frecuentemente rebajada por la actividad humana. (Directiva 80/68, relativa a la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación causada por determinadas sustancias peligrosas).

Agujero de la capa de ozono: Agujero en la capa de ozono de la estratosfera producido por la acción de gases clorados (CFCs). Esta capa nos protege de la acción de los rayos ultravioletas del sol. En amplias zonas del hemisferio sur, donde el agujero es mayor, se han incrementado notablemente los cánceres de piel.

AGV (ácidos grasos volátiles): Lo constituyen los principales productos de la fermentación animal, principalmente de los hidratos de carbono. Los *ácidos grasos volátiles* primarios son el ácido acético, propiónico y butínico. Con frecuencia los *ácidos grasos volátiles* son denominados como sus iones disociados; Acetato, propionato y butirato. Otros *ácidos grasos volátiles* cuantitativamente menores pero metabólicamente importantes son: el valérico, isovalérico, isobutírico y el 2-metil-butínico.

AGP: (Almacenamiento Geológico Profundo) Es el lugar donde deben almacenarse durante un periodo de miles de años los residuos nucleares de alta actividad o de semiperiodo largo. Debe asegurar la protección a largo plazo del hombre y del medio ambiente y resistir el calor residual que emite el combustible gastado. Es importante durante un periodo prolongado de tiempo, disiparlo adecuadamente y ser estable a los cambios térmicos que conlleva su almacenamiento durante varios miles de años.

Agroquímicos: Nombre genérico que reciben los productos químicos que se usan en las actividades rurales: agrícola, ganadera.

AID: Asociación Internacional para el Desarrollo. Trabaja con fines medioambientales.

AIMPLAS (Instituto Tecnológico del Plástico): Centro de Innovación y Tecnología (CIT) reconocido por el Ministerio de Ciencia y Tecnología. Fue creado en 1990 como asociación empresarial de ámbito nacional e internacional. Su campo de actuación se centra en la investigación aplicada al sector de transformación de los materiales plásticos y el apoyo al desarrollo e innovación tecnológica del sector a través de soluciones integrales adaptadas a las empresas.

Aire de combustión: Aire preciso para aportar el oxígeno necesario para combinarse con el hidrógeno, carbono y azufre de un combustible. En las incineradoras, el aire de combustión es el aire introducido en la cámara-horno a través del ventilador de aire de combustión primario por medio de un venteo de la fosa de recepción de residuos.

Aire húmedo: Aire ambiente que contiene una cantidad variable de vapor de agua. El máximo contenido de vapor de agua viene fijado por la temperatura. Si ésta desciende se alcanza el punto de rocío y el vapor condensa a agua líquida.

Aire, criterio de calidad del: Niveles de polución y tiempos de exposición bajo los que es posible que se den efectos adversos a la salud y el bienestar.

Aire, estándares de calidad de: Niveles de polución determinados por las regulaciones que no deben excederse durante un tiempo especificado en un área determinada.

Airear: Incorporar oxígeno en la pila de compostaje.

Aireante: u oclusores de aire, son aditivos, cuya función principal es producir en el hormigón un número elevado de finas burbujas de aire, de diámetros comprendidos entre 25 y 200 micras, separadas y repartidas uniformemente. Estas burbujas deben permanecer tanto en la masa del hormigón fresco como en el fraguado. Principalmente los aireantes están basados en resinas Vinsol, jabones sintéticos y jabones minerales. Confieren al hormigón dos propiedades principales, una en su estado fresco dándole mayor fluidez y otra en el hormigón endurecido dándole mayor durabilidad.

Aislamiento acústico: de una pared indica la reducción sonora en decibelios (dB) producida por la interposición de la misma entre dos medios, siendo uno la fuente sonora y el otro el local receptor.

Aislamiento térmico: es la capacidad de los materiales para oponerse al paso del calor por conducción. Se evalúa por la resistencia térmica que tienen.

Aislantes opacos: Son todos aquellos materiales que tienen la capacidad de dejar pasar la luz pero evita la salida de los rayos infrarojos (del calor).

Aislantes transparentes: materiales que tiene la capacidad de absorber la energía que reciben. Son aislantes que no dejan pasar la radiación infrarroja pero sí la luz.

Aislante térmico: Materiales que se colocan en techos, tabiques y muros y reducen la interacción calorífica (flujo de calor) entre un sistema y su entorno. Los aislantes térmicos pueden ser de origen vegetal (corcho, fibra de madera), sintéticos (poliestireno, poliuretanos) o minerales (fibra de vidrio, arcilla expandida). // La propiedad, poseída en distintos grados por diversos materiales, de impedir o reducir la transmisión del calor.

Ajuste: Respuesta en el comportamiento de los organismos a un cambio en las condiciones ambientales.

Alabastro: Yeso, sulfato de calcio cristalizado en el sistema monoclínico.

Albarrada: Pared que se levanta interceptando un curso de agua para disminuir su velocidad, utilizada en obras de corrección hidrológica.

Albedo: Medida de la fracción de radiación solar incidente que es reflejada por la tierra y la atmósfera. El albedo de la tierra oscila alrededor de 0,5. La nieve y las superficies de las nubes tienen un albedo muy alto, próximo a la unidad. La vegetación y el mar presentan un albedo bajo, cerca del cero, debido a que absorben una gran cantidad de energía.

Albúmina: Proteína soluble en agua. Sirve para transportar sustancias en la sangre. Coagulan por el calor.

Alcalímetro: Aparato o sistema para medir la alcalinidad del agua. El valor TA indica el contenido del agua en hidróxidos.

Alcalinidad del agua: Capacidad del agua para neutralizar los ácidos.

Alcalinización: Degradación del suelo, dándole propiedades alcalinas, con un pH superior a 7,0.

Alcanos: Son los constituyentes mayoritarios de las emisiones de hidrocarburos antropogénicos.

Alcanfor: véase *Naftalina.*

Alcantarilla: Conducto, generalmente subterráneo, por donde discurren las aguas residuales y el agua de lluvia de una zona urbanizada.

Alcantarillado, red de: Canales de conducción de agua residual proveniente de hogares, comercios e industrias y de agua de lluvia mediante los cuales es transportada a una depuradora.

Alcohol: Nombre genérico que se da a los compuestos hidrocarbonados que tiene un átomo de hidrógeno sustituido por un grupo hidróxilo. La fórmula genérica es R-OH, en la que R significa un radical alifático o aromático. En particular el término alcohol se usa comúnmente para designar el alcohol etílico.

Aldehído fórmico: Véase *Metanal*.

Aldrin: Compuesto Orgánico Persistente. Derivado clorado del naftaleno; usado como insecticida por contacto; incorporado a los plásticos para hacerlos resistentes a las termitas; usado en agricultura especialmente contra las larvas de escarabajos. Es efectivo contra muchos insectos, pero es venenoso para los vertebrados. La directiva 86/280 (modificada en la directiva 88/347), fija las normas de aguas, a cumplimentar a partir de 1.1.89, sobre las concentraciones en los sedimentos, moluscos, crustáceos y peces que no debe aumentar de forma significativa con el tiempo.

Aleación: Adición de un metal a uno o varios elementos distintos.

Aler, Proyecto: Es un trabajo realizado en el año 2002 por el autor de este libro en conjunto con profesionales de Colombia donde se fabricó árido ligero a partir de fangos de depuradoras, fangos de papeleras y arcilla.

Alevines: Peces jóvenes.

Alfisoles: Suelos relativamente jóvenes, ácidos y caracterizados por un enriquecimiento arcilloso del horizonte B, dándose normalmente en bosques de caducifolios asociados a climas subtropicales.

Algicida: Pesticida. Sustancia química usada para eliminar las algas.

Alicíclicos: que se puede disolver en grasas o aceites.

Alifáticos: Compuestos orgánicos (hidrocarburos) de cadena abierta derivados del metano.

Alimentos integrales: Alimentos no adulterados, enteros, y sin refinar y mínimamente procesados aunque no necesariamente orgánicos.

Alimentos naturales: Alimentos sin preparación recogidos de la naturaleza.

Alinita: Cemento de alinita: se produce a partir de cenizas volantes de incineración de RSU.

Aliviadero: Parte de un azud o una presa por la que se facilita la evacuación del caudal rebosante. // *Aliviadero de presa:* presa auxiliar construida junto a un embalse al objeto de descargar el exceso de agua que se produce durante una avenida y al mismo tiempo evitar que el nivel de agua se eleve por encima del nivel calculado para la presa.

Alita: o silicato tricálcico. Se puede considerar como componente decisivo del clinquer. Determina la rapidez de fraguado y la resistencia mecánica. Su cantidad en el clinquer está entre el 35 y el 70 por ciento.

Almadraba: Arte de pesca fijo, de grandes dimensiones, que se cala en estuarios y bahías cerradas para la pesca del atún. Consta de un sistema de redes verticales por las que los atunes son conducidos hasta un copo o cámara final.

Almazara: Establecimiento agroalimentario dedicado a la obtención de aceite de oliva mediante prensado. Molino de aceite.

Almidón: Hidrato de carbono perteneciente a la familia de los polisacáridos y dentro de ellos a las hexosanas (C6HO)x · HO. Se encuentra ampliamente distribuido en los vegetales que lo sintetizan gracias a la clorofila.

Alotropía: Cambio reversible de un sistema de cristalización a otro, debido a un cambio de temperatura,

Alpechín: Residuo líquido acuoso resultante del proceso de obtención de aceite de oliva en las almazaras.

Alperujo: subproducto de las almazaras durante la extracción de aceite de oliva. Es la mezcla de: aguas de vegetación o alpechines; partes sólidas de la aceituna, como el hueso, el mesocarpo y la piel; y restos grasos. Se define como todo aquello que resta de la aceituna molturada si eliminamos el aceite de oliva.

Alquitrán: Líquido oscuro que a baja temperatura condensa en una masa negra y de olor desagradable. El más estudiado procede de la destilación seca de la hulla. De su destilación se obtienen los aceites ligeros, medios, pesados, aceites de antraceno y la pez.

Alquitrán de Hulla: Producto químico secundario generado en el proceso de producción de coque, por destilación destructiva de la hulla bituminosa. Es un líquido (semisólido) negro viscoso, con olor a naftaleno. Una tonelada de coque produce 30 litro de alquitrán. Se emplea para fabricar otros productos y según como se use puede ser un carcinógeno humano.

Alófana: Término genérico que se usa para describir materiales solicoaluminosos altamente desordenados o amorfos.

Alternador: Máquina eléctrica rotativa que transforma energía mecánica en energía eléctrica de corriente alterna.

Alternancia de cultivos: Método de rotación de los diversos cultivos para mantener o incrementar la fertilidad del suelo y así mejorar los rendimientos de la tierra.

Alto horno: Horno empleado en la siderurgia de base donde el mineral de hierro (normalmente óxidos) es reducido por la acción del coque hasta lograr el arrabio.

Altocúmulos: Nubes de tipo cúmulo generadas por corrientes ascendentes.

Alúmina: Óxido de aluminio. Producto muy refractario con punto de fusión superior a los 2.000 ℃. // Material de color blanco de consistencia similar a la arena fina. La industria emplea el proceso Bayer para producir alúmina a partir de la bauxita. La alúmina es vital para la producción de aluminio, se requieren aproximadamente dos toneladas de alúmina para producir una tonelada de aluminio.

Aluminio: es el elemento químico, de símbolo Al y número atómico 13. Con el 8,13% es el elemento metálico más abundante en la corteza terrestre. Su ligereza, conductividad eléctrica, resistencia a la corrosión y bajo punto de fusión le convierten en un material idóneo para multitud de aplicaciones, especialmente en aeronáutica. Sin embargo, la elevada cantidad de energía necesaria para su obtención dificulta su mayor utilización; dificultad que puede compensarse por su bajo coste de reciclado, su dilatada vida útil y la estabilidad de su precio.

Alumbre: Sulfatos dobles hidratados de metales alcalinos y alcalinotérreos.

«Aluminio Hall»: Aluminio de primera fusión obtenido después del proceso de electrólisis.

Aluminosis: Patología (básicamente pérdida de resistencia) que presentan ciertos hormigones aluminosos por la hidratación que se produce con el tiempo. Por lo general es debido a una mala utilización de este tipo de cementos.

Alunita: Mineral perteneciente a la familia de los sulfatos, que tiene como fórmula $KAl_3[(OH)_6(SO_4)_2]$; su densidad es de 2,75. Producto base para la producción del alumbre y de determinados fertilizantes potásicos.

Aluviales, depósitos de: Están compuestos por arcilla, arena, grava y otros materiales que han sido trasladados en suspensión por ríos o inundaciones y se han depositado en lugares, donde, por alguna razón, la velocidad de la corriente es insuficiente para mantenerlos en suspensión. La sedimentación, de época geológica reciente, formada en el proceso de deposición de los ríos activos, se conoce por *alluvium.*

Amalgamación: Proceso minero donde se utilizan molinos de piedra llamados trapiches para moler el mineral y conjuntamente con el agua formar una especie de lodo o barro acuoso. Debido a la gran afinidad del oro por el mercurio, al solo contacto se produce una amalgama de Hg-Au. La masa fluida de amalgama se prensa en paños, con lo cual, se desprende el mercurio so-

brante. Posteriormente el mercurio unido al oro se volatiliza, quemándolo a temperaturas sobre los 360ºC en forma directa o con ácido nítrico, obteniendo oro bruto de un 99,9% de pureza.

Ameba: Microorganismo de una sola célula.

Amianto: Fibra mineral. Se presenta en forma de piedra de estructura fibrosa que se disgrega en filamentos cortos, flexibles y muy poco resistentes. Es incombustible por lo que se ha usado para revestimientos ignífugos, filtros para ácidos. Por tratarse de un producto cuya inhalación puede generar cáncer de pulmón se halla sujeto a muchas restricciones legislativas. La directiva marco 80/1107, relativa a la protección de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a agentes químicos, físicos y biológicos durante el trabajo y en particular, la directiva 83/447 se aplica a toda actividad industrial que implique el uso de fibras de amianto. También la directiva 87/217 trata sobre la prevención y la reducción de la contaminación del medio ambiente producida por el amianto. Otras Directivas de interés son 83/478 y 85/610 relativas a la comercialización y uso del amianto. En España, RD 108/1991 sobre prevención y reducción de la contaminación del medio ambiente por el amianto.

Amianto blanco: o crisolita, hace referencia a un grupo de silicatos hidratados microcristalinos fibrosos de composición química variable de variedad de las serpentines. En España se estima que el 90% del amianto utilizado es de esta variedad.

Amianto azul: véase *Crocidolita.*

Aminas: Compuestos orgánicos formados al sustituir átomos de hidrógeno del amoníaco por radicales orgánicos. Si estas son alkilo se forman las aminas alifáticas y si son arilo (o aralkilo) las aminas aromáticas.

Aminoácido: Pequeñas moléculas orgánicas que contienen carboxyl y un grupo amino unidas en el mismo átomo de carbono. Aminoácidos son los monómeros con los que se constituyen los polipéptidos y las proteínas.

Amoníaco (NH_3): Gas incoloro y picante, punto de ebullición –33,5 ℃, extraordinariamente soluble en el agua y mucho en el alcohol. Se forma por descomposición bacteriológica de las proteínas, purinas y urea. Rotura de aminoácidos en residuos orgánicos, obteniéndose en gran escala del nitrógeno atmosférico y del licor amoniacal resultante de la fabricación del gas del alumbrado. También se obtiene bajo la acción humana, en la combustión de carbón y fuel-oil, y el tratamiento de residuos. La vida estimada es de 1 a 24 días. El mecanismo de eliminación en la atmósfera es la reacción a NH_4.

Amonio: Ion monovalente positivo, de fórmula NH_4^+, cuyas sales se comportan casi igual a las sales de los metales alcalinos.

Amorfo: En cristalografía, lo contrario de compuesto cristalizado. Es decir, los átomos que lo integran no tienen una secuencia de ordenamiento regular. Son estructuras atómicas desordenadas, como el vidrio común.

Anabolismo: Energía potencial, o energía endotérmica, como contrapunto al metabolismo. Síntesis de materia viva.

Anaerobio: Organismo que es capaz de vivir sin oxígeno. Que no requiere oxígeno molecular para la extracción de energía de los alimentos (respiración).

Anaerobiosis: Forma de vida de los microorganismos anaerobios los cuales, para conseguir la actividad metabólica, obtienen la energía a partir de los procesos de oxidación en qué el receptor final de electrones es un compuesto orgánico.

Analcima: Mineral alumossilicato sódico hidratado del grupo de las zeolitas ($AlSi_2O_6Na.H_2O$).

Analgésicos: Fármacos que se emplean para mitigar el dolor. El exceso y el mal uso conduce a que grandes cantidades de estos medicamentos acaben en los ríos provocando efectos inesperados.

Análisis del ciclo de vida: Evaluación, mediante un conjunto sistemático de procedimientos, de las entradas y salidas de materia y energía y del impacto ambiental atribuible directamente a un producto a lo largo de su ciclo de vida.

Análisis elemental: Caracteriza las muestras en los elementos básicos que lo integran.

Análisis inmediato: Caracteriza a las muestras en términos de sus contenidos de humedad, volatiles, carbono fijo y cenizas. Los resultados obtenidos varían según las condiciones empleadas en este análisis, temperaturas alcanzadas, velocidades de calentamiento.

Anátidas: Patos, gansos, cisnes y afines. Aves acuáticas migradoras, presentes en numerosos hábitats de agua dulce. Algunas especies también frecuentan las costas.

Anecoica: Cámara recubierta de material absorbente acústico que se emplea para determinar niveles de ruido.

Anenómetro: Instrumento que permite medir la velocidad del aire.

Anergia: Falta de energía, inactividad.

Anfiboles: Mineral del grupo de los ionosilicatos. Químicamente los anfíboles son silicatos que contienen los mismos tipos de elementos que los piroxenos pero también contienen grupos hidroxilo (OH). Presentan hábito generalmente alargado o acicular y se encuentran fundamentalmente en las rocas ígneas y metamórficas.

Anfípodo: Tipo de crustáceo que vive en las profundidades oceánicas.

Anfótero: Dicese de la molécula que contiene un radical base y otro ácido, pudiendo así actuar bien como ácido o bien como base, según el medio en que se encuentre; como sucede con los aminoácidos.

Angel Azul: Simbología alemana que se utiliza para diferenciar los productos que obtiene el certificado o etiqueta ecológica.

Angiospermas: (nombre científico *Angiospermae*, del latín angi -«encerrada», y del griego sperma -«semilla») o también llamadas magnoliófitas, es una de las principales divisiones botánicas que contiene las plantas con flor. En las angiospermas se produce el fenómeno de la doble fecundación.

Anhídrido carbónico (CO_2): Dióxido de carbono. No se considera un contaminante atmosférico a escala local sino más bien un contaminante a nivel global planetario, debido a su repercusión y contribución en el efecto de calentamiento del planeta. Es un gas incoloro, incombustible y de olor y gusto suavemente ácidos. En estado libre es componente del aire en muy baja proporción, aproximadamente 0,05% en volumen.

Anhídrido sulfuroso (SO_2): Dióxido de azufre. Gas incoloro formado cuando se quema el azufre en el aire, oxidación natural de H_2S, actividad volcánica. Se origina en la combustión de combustibles fósiles con contenidos de azufre como el petróleo y el carbón. Se utiliza en máquinas frigoríficas, en la fabricación de ácidos de azufre, para la conservación de piensos, para el espolvoreo contra parásitos y como medio para impedir la putrefacción y la fermentación. Es uno de los contaminantes de la atmósfera más peligrosos puesto que contribuye a la lluvia ácida.

Anhídridos: Compuestos químicos resultantes de la combinación de los no metales con el oxígeno, entre los que se incluyen compuestos orgánicos y óxidos inorgánicos, que se combinan con el agua para formar ácidos o bien pueden obtenerse de éstos últimos por eliminación del agua.

Anhidrita: Sulfato de calcio anhidro: SO_4Ca. Tiene poco uso en la práctica. El hidrato: $SO_4Ca \cdot 2HO$, yeso, es más corriente y abundante.

Anilina: También conocida como fenilamina o aminobenceno. Es un compuesto orgánico, líquido entre incoloro y ligeramente amarillo de olor característico. No se evapora fácilmente a temperatura ambiente. La anilina es levemente soluble en agua y se mezcla fácilmente con la mayoría de los solventes orgánicos. La anilina es usada para fabricar una amplia variedad de productos como por ejemplo la espuma de poliuretano, productos químicos agrícolas, pinturas sintéticas, antioxidantes, estabilizadores para la industria del caucho, herbicidas, barnices y explosivos.

Animales filtradores: En las comunidades bentónicas y planctónicas, comedores de detritus que recogen partículas del agua. En las comunidades bentónicas predominan habitualmente en fondos arenosos.

Anión: Ion negativo, es decir, átomo o molécula que ha ganado uno o más electrones en un electrolito, siendo atraído por lo tanto por el ánodo, el electrodo positivo.

Aniónico: Relativo al anión.

Anisakis: Parásito que vive en el interior de los peces y causa problemas de alergias o gastroenteritis cuando se ingiere, normalmente crudo o poco cocinado.

Anodización: Tratamiento oxidante de los metales para hacerlos resistentes a la corrosión.

Anodizar: Proceso de tratamiento de superficie que consiste en depositar el elemento a tratar en el interior de un baño electrolítico. El metal a depositar se halla disuelto en el baño (los aniones) y por aplicación de una corriente eléctrica se dirigen al ánodo (polo positivo) que es precisamente la pieza a tratar.

Ánodo: Electrodo al que se dirigen los iones negativos (aniones).

Anortita: Tipo de feldespato. Silicato cuya fórmula química general es $Ca\ Al_2Si_2O_8$

Anóxico: Proceso bioquímico que se desarrolla en ausencia de oxígeno.

ANSI (American National Standard Institute): Es el mayor organismo de estandarización de los Estados Unidos.

Antibiótico: Dícese de la sustancia química producida por un ser vivo o fabricada por síntesis, capaz de paralizar el desarrollo de ciertos microorganismos patógenos (acción bacteriostática) o de causar la muerte de ellos (acción bactericida).

Anticiclón: Área de alta presión atmosférica que aumenta hacia el centro. Suele originar tiempo despejado; el viento gira en el sentido de las agujas del reloj y hacia afuera en el hemisferio norte, y al contrario en el sur.

Anticuerpo: Sustancia de naturaleza proteica capaz de destruir o neutralizar gérmenes o las toxinas que producen.

Antígeno: Sustancia que introducida en un organismo animal, da lugar a reacciones de defensa, como la formación de anticuerpos.

Antidetonante: Aditivo que, añadido a la gasolina, evita la detonación espontánea en los motores de explosión, hasta compresiones elevadas.

Antioxidante: Sustancias que retardan la oxidación de un compuesto, sobre todo dan estabilidad química frente a la temperatura.

Antraceno: Hidrocarburo de fórmula. Da nombre a una extensa familia de compuestos tóxicos que suelen formarse en la combustión.

Antracita: Carbón fósil seco que se formó a partir de la hulla. De lustre vítreo, arde con dificultad. Carbón de alto poder calorífico.

Antrópico: relativo o provocado por la especie humana.

Antropogénico: Producido o relativo al impacto provocado por la acción del hombre en el medio ambiente.

Anubares: Tubos de Pitot que calculan la medida de la velocidad de la corriente de gases en el interior de una tubería.

AOX: Factor determinante en el proceso productivo que indica la cantidad de compuestos clorados orgánicos en las aguas residuales. El valor AOX promedio de las pa-

peleras en Europa en 1985 era de 8 kg por tonelada de pasta. El cero absoluto corresponde a compuestos presentes en las materias primas, como el agua y la madera, pero no al proceso productivo. // Véase *Halógenos orgánicos adsorbibles*.

Apatito: es un mineral de base fosfática con cristales hexagonales. El color es variable aunque predominan los cristales incoloros, de color parduzco o verdoso. La apatita se encuentra en betas hidrotermales, permatitas y caliza metamórfica además de sedimentos donde se produce a partir de depósitos orgánicos. El esmalte de los dientes y una parte de los huesos está formada por apatita.

APEAL: Association of European Producers of Steel for Packaging.

Apelusado: Proceso adhesivo en el cual se aplican fibras cortadas en trozos pequeños a un patrón de adhesivo que ha sido «preestampado» sobre un tejido.

Apicultura: Cría de abejas para la obtención de miel y cera.

Aplita: Roca filoniana, cuyos componentes principales son el cuarzo y el feldespato potásico y cuyos componentes secundarios son la biotita, moscovita, turmalina y hornblenda. Se origina al final del proceso de cristalización de los cuerpos intrusivos.

APME: Association of Plastics Manufacturers in Europe.

«Aplicación al suelo»: bajo esta denominación se agrupa a un conjunto de vías de gestión de fangos que van desde la agricultura de producción hasta material «alternativo» para obra civil.

Apoptosis: Muerte celular programada.

Aportación: Volumen de agua que atraviesa una sección durante un espacio de tiempo de referencia. Generalmente se utiliza la aportación anual.

Aquitardos: Obstáculos a barreras que impiden, o demoran, la circulación del agua subterránea.

Araclor: Nombre comercial de compuestos organoclorados (PCB's).

Aragonito: Mineral que responde a la misma formula que la calcita, carbonato cálcico, pero cristaliza en otros sistema.

Arbolado resistente a los gases: Especies vegetales que pueden crecer en medios muy contaminados por gases y humos. Por ejemplo, la encina, el haya y el arce se utilizan en medios contaminados por el dióxido de azufre.

Arcilla: La arcilla es un mineral procedente de la descomposición de rocas que contienen feldespato, por ejemplo granito, originada en un proceso natural que demora decenas de miles de años. Físicamente se considera un coloide, de partícula extremadamente pequeña y superficie lisa. Químicamente es un silicato hidratado de alúmina. Se caracteriza por adquirir plasticidad al mezclarla con agua, y también sonoridad y dureza al calentarla por encima de 800ºC. La arcilla endurecida mediante la acción del fuego fue la primera cerámica elaborada por el hombre, y aún es uno de los materiales más baratos y de uso más amplio.

Arcilla expandida: Es un material aislante de origen cerámico, con estructura interna altamente porosa, derivada de la expansión a altas temperaturas. Su elevada resistencia intrínseca la hace apta para su utilización, tanto en morteros aislantes ultraligeros como en hormigones ligeros de altas prestaciones.

Arcilla roja: Depósito sedimentario de origen marino rico en óxidos de hierro y que se encuentra en profundidades superiores a los 4 km. A partir de la roca madre se origina por el polvo transportado por el viento (incluidas las partículas volcánicas), nódulos de manganeso, polvo de meteoritos y restos orgánicos insolubles.

ARCSOLV: sistema de destrucción del amianto, y se basa en la capacidad de los hidrofluorhídrico para la destrucción de los silicatos (asbestos)

Área deprimida: Es la que, por comparación con otras, muestra una situación de fuerte desempleo, escasa inversión y renta estancada. Tal situación es característica de zonas muy afectadas por los cambios tecnológicos. // Dícese de terrenos con cotas geodésicas muy inferiores al contorno.

Área protegida: Definición según Convenio de diversidad biológica; área definida geográficamente que haya sido designada o regulada y administrada a fin de alcanzar objetivos específicos de conservación. // Una zona dedicada en primer lugar a la protección y disfrute del patrimonio natural o cultural, el mantenimiento de la biodiversidad y/o el mantenimiento de los sistemas que sostienen la vida.

Arena negra: Concentrado sedimentario basto de minerales pesados, formado por la acción del agua y/o el viento.

Aridisols: Suelos de desiertos y regiones áridas, generalmente con perfiles minerales. La acumulación de sal, yeso y carbonato es muy común en este tipo de suelos.

Árido: Seco; relativo a zonas donde hay más agua que abandona el ecosistema (mediante evaporación o transpiración) que la que entra (mediante precipitación) // Componente de los hormigones.

Árido poroso: componente inerte usado como integrante en la fomrlación de hormigones, yesos o morteros.

Áridos reactivos: áridos que sufren diferentes mecanismo de reacción con alcalis, hidróxido de calco y agua, estos considerados como componentes de la fase intersicial del hormigón. Existen métodos para poder establecer la reactividad potencial de un árido.

Ariete hidráulico: Equipo de elevación de agua de carácter pulsativo que aprovecha la energía cinética del agua.

ARPAL: Asociación de Reciclaje de Productos de Aluminio. Asociación española sin ánimo de lucro que asegu-

ra a sus asociados la máxima eficacia en la promoción de los productos de aluminio a través de su reciclado. Nació en abril de 1994 con el objetivo de promover el reciclado de envases y botes de bebidas de aluminio usados y de otros productos del mismo material.

Aromáticos: Compuestos orgánicos (hidrocarburos) de cadena cerrada que guardan estrecha relación con el benceno (C_6H_6).

Aromatizantes: Aditivo alimentario. // Contaminante orgánico.

Arqueas: Categoría de microorganismo. Corresponden a este grupo las bacterias generadoras de metano.

Arqueta: Construcción, enterrada o que sobresale, abierta por encima o tapada, donde confluyen una o más tuberías y que permite el acceso a la conducción.

Arquitectura solar o bioclimática: Conjunto de soluciones arquitectónicas que permiten la captura, almacenamiento y distribución de la energía solar que incide sobre el edificio mediante la combinación de paredes opacas y transparentes, de la masa térmica del edificio, de la circulación natural del aire y de colectores solares, teniendo en cuenta las condiciones climatológicas locales. Aprovechando los recursos disponibles (sol, vegetación, lluvia, vientos) se puede conseguir que los consumos de energía para calefacción, refrigeración y los de agua, disminuyan. // Es aquella arquitectura que tiene en cuenta el clima y las condiciones del entorno (recursos disponibles como el sol, vegetación, lluvia, vientos) para ayudar a conseguir el confort térmico interior de una vivienda. Juega exclusivamente con el diseño y los elementos arquitectónicos, sin utilizar sistemas mecánicos, que son considerados más bien como sistemas de apoyo.

Arrabio: Primer compuesto obtenido en el alto horno. Se produce como consecuencia de la mezcla de mineral de hierro, coque y caliza a elevadas temperauras. El coque se quema como combustible para calentar el horno, y al arder libera monóxido de carbono, que se combina con los óxidos de hierro del mineral y los reduce a hierro metálico.

Arrastre automático: Limpieza de alcantarillas por medio de una fuerte corriente de agua, que impide la decantación de materiales pesados.

Arrecife artificial: Barrera (arrecife) formada en el mar a partir de materiales sólidos de desecho para proteger a los organismos marinos. Es un método efectivo para la deposición de ciertos materiales sobrantes y la defensa de la costa.

Asbesto: Especies minerales (ver amianto) que aparecen en capas formando cristales fibrosos sumamente finos, que resultan elásticos y permite hacer con ellos tejidos. Resisten sin alterarse las temperaturas elevadas, por lo que se emplean para hacer cortinas a prueba de fuego, etc. Combinados con otros minerales se usan también en construcción y en pintura, comunicando resistencia al fuego. Pueden contaminar el aire o el agua y causar cáncer o asbestosis cuando son inhalados.

Asbestosis: Enfermedad pulmonar asociada con una exposición continuada e inhalación de fibras de asbestos, caracterizada por el endurecimiento de los tejidos pulmonares. Esta enfermedad produce la paulatina dificultad en la respiración y puede llegar a provocar la muerte.

Asfalto: Distintas sustancias de origen natural, o residuos de la destilación del petróleo, o mezclas de betún asfáltico y trozos de granito, arena o caliza en polvo.

Ash in: Expresión anglosajona que se utiliza para referirse a viñetas satíricas, gráficas y cómics, que representan y ridiculizan a los que atentan contra el medio ambiente. Textualmente «ash» significa ceniza.

Asimilación: (Soc.) Adaptación de grupos o individuos a la vida cultural y social. (Biol.) Transformación de sustancias ajenas a protoplasma en sustancias propias de él.

Askarel: Uno de los fluidos dieléctricos más utilizados en transformadores de alto voltaje. Contiene de 40 a 70 % de PCB. El Askarel es el término que identifica la combinación de Aroclor (nombre comercial que se le dio a los PCB) y triclorobenceno o la combinación de PCB con compuestos bencenoclorados. Son productos peligrosos clasificados como PCBs, son sustancias química y térmicamente estables, no son inflamables, pero se descomponen peligrosamente por acción del fuego o calor muy intenso, no biodegradables, bioacumulativos y altamente persistentes al medio ambiente; no son corrosivos con los metales y descompone lentamente al caucho, la goma sintética y los plásticos comunes, casi no ataca el PVC y los epoxis. Su fórmula molecular es: $C_{12}H_{(10-X)}CL_{(X)}$, donde $X > 2$.

ASPAPEL (Asociación Española de Fabricantes de Pasta, Papel y Cartón): Es una organización profesional de ámbito estatal constituida en 1977 que agrupa a las empresas del sector de la celulosa y el papel. Las empresas asociadas suponen el 75% de la producción del sector. Como organización profesional, ASPAPEL defiende y representa los intereses del sector, con el objetivo prioritario de mejorar la competitividad de las empresas en el marco del desarrollo sostenible.

Aspergillus: es un género de alrededor de 200 hongos (mohos), es ubícuo. Su hábitat natural está constituido por el heno y el compostaje. Se catalogó por primera vez por el biólogo italiano P. Micheli.

ASR (Residuos de la fragmentación de automoviles), son aquellos residuos que se generan por acción del desguace de automóviles, luego de haber recuperado los materiales posibles de reciclar.

Asteroide: Cuerpo de pequeño tamaño que orbita alrededor del Sol.

Astillas: Fragmento irregular que salta o queda de una pieza u objeto de madera que se parte o rompe violentamente

Asulam: Herbicida translocado del grupo de los carbamatos que se usa para eliminar la malva silvestre en pastos y huertos y los helechos en los pastos altos y en los bosques.

Ataguia: Elemento que sirve de obstáculo al paso del agua. Pueden estar construidos a intervalos a través de un canal o río para evitar el excesivo desgaste del lecho o para aumentar la anchura de la lámina de agua.

Atapulgita: Especie de mineral de arcilla con una notable capacidad de intercambio catiónico.

ATC: Almacenamiento temporal centralizado (ATC). Espacio físico donde los residuos de alta actividad provenientes del: desmantelamiento de instalaciones nucleares, los elementos de combustible gastado y los vidrios provenientes del reprocesado, son almacenados por un periodo de 60 a 100 años a la espera de su destino final.

Atenuación: Proceso a través del cual se reduce la concentración de un compuesto mediante la dilución, adsorción, degradación y transformación.

ATEX: Directiva 94/9/CE, conocida como «Directiva ATEX». Trata sobre el manejo y prevención de atmósferas potencialmente explosivas.

ATI's: Almacenes temporales en la misma instalación. Espacios ubicados en la misma instalación nuclear creados para almacenar momentáneamente los combustibles nucleares usados en los reactores nucleares, a la espera de su destino final.

Atmósfera: Capa gaseosa que envuelve la Tierra. El aire atmosférico seco contiene diversos gases en las siguientes proporciones en peso: nitrógeno 75,5; oxígeno 23,14; argón 1,3; dióxido de carbono 0,05; criptón 0,028; xenón 0,005; neón 0,00086; helio 0,000056. También hay trazas de otros gases, incluidos el hidrógeno y ozono. En los últimos siglos, la actividad industrial ha provocado cambios en la composición natural de la atmósfera, adicionando residuos gaseosos y sólidos. Los gases contenidos en la atmósfera a nivel de trazas ~~en~~ muy baja proporción~~,~~ son los que caracterizan la calidad del aire en los entornos concretos. El contenido en vapor de agua varía enormemente. El aire, a una temperatura dada, puede contener vapor de agua hasta el límite conocido por punto de saturación. La cantidad de vapor de agua que satura a un volumen dado de aire aumenta con la temperatura y si, por lo tanto, el aire saturado se enfría, el exceso de vapor de agua se condensa en forma de niebla.

Atomización: Operación de aspersión de un líquido con un tamaño de gota muy pequeño en el seno de un gas.

Atomizador: equipo industrial que lleva a cabo el proceso de atomización. (véase Atomización).

Atomizar: Pulverización.

ATP: Adenosín trifosfato. El alimento y oxígeno ingresado en el organismo humano pasa a las mitocondrias donde se convierte en ATP. Se comportan como reservorios energéticos.

Atterberg, **Límite de:** Ensayo que se lleva a cabo para mirar la plasticidad de las arcillas y con ello su aplicación a la agricultura. Se trata de ver la cantidad de agua que es compatible con una determinada cantidad de arcilla.

Atricción: Forma de trituración muy fina que se consigue a base de hacer chocar a alta velocidad las partículas entre sí.

Auditoría ambiental: Análisis sistemáticos y objetivo del estado de cumplimiento de la normativa medioambiental en una industria y/o hábitat, y de los riesgos y pasivos económicos que se derivan frente al Estado, a terceros y a sus propios empleados. Incluye la Auditoría de Residuos y Emisiones.

Auditoría de residuos y emisiones orientada a la minimización: Análisis de una instalación industrial que tiene como objetivo identificar la totalidad de flujos de residuos y emisiones que se generan (sólidos, líquidos y gaseosos), las fuentes y las causas de su generación y el coste de su gestión.

Auger: Dispositivo para mover material pastoso o líquido en suspensión por medio de hélice rotatoria. Los materiales son movidos alrededor del diámetro de rotación.

Autoclave: Aparato utilizado para la esterilización. La acción se obtiene a partir del calor húmedo que se consigue al hacer hervir el agua dentro de un depósito cerrado a una presión superior en la atmósfera.

Autodepuración: Proceso biológico, químico o físico que permite a un medio contaminante volver a su estado natural sin intervención humana.

Autoecología: Estudio de las relaciones entre cada una de las especies de los seres vivos y su ambiente. Estudio de la ecología de una especie determinada (límites térmicos, de humedad, tipo de suelos en que se presenta, etc.). Se opone a sinecología, que corresponde al estudio más global e integral de las interacciones de los organismos con el ambiente.

Autoignición: Temperatura a la cual un combustible supera el umbral de la energía de activación y se inicia la combustión.

Autorización: Permiso que concede la autoridad competente para el vertido de aguas residuales.

Autotrofos: Ser vivo capaz de elaborar materias alimenticias partiendo de sustancias simples.

Auxina: Herbicida fabricado a base de plantas comunes.

Avenida: Crecida repentina y violenta de un caudal de agua, especialmente en un barranco, un torrente, etc.

Avogadro, Ley de: También denominado Principio o Número, ya que determina el número de átomos que contiene un gramo de un elemento.

Azeotrópica, mezcla: Mezcla de dos líquidos que presentan un punto de ebullición constante.

Azud: Obra realizada en el cauce de un río con el fin de provocar una retención que sirva para desviar el agua de su curso normal. El azud no crea desniveles de agua importantes ni proporciona capacidad de regulación.

Azufre, dióxido de: Véase *Anhídrido sulfuroso (SO_2)*.

Azul de metileno: Colorante del grupo de las anilinas. Se usa en la industria textil y como colorante orgánico. La capacidad de eliminar micropartículas de azul de metileno se utiliza como medida de la eficacia de un sistema de filtración.

Bacilo: «Esporas» formadas por agrupaciones de bacterias. De hecho, es una táctica de reproducción.

BACT (Best Avaible Control Technology): La mejor tecnología disponible (según procesos de producción, métodos, sistemas y técnicas) para el control de emisiones. Se basa en la obtención del máximo grado de reducción de la emisión teniendo en cuenta aspectos energéticos, medioambientales, impactos económicos y costes.

Bacteria: Organismo unicelular, microscópico, sin clorofila ni núcleo, pero con gránulos de cromatina dispersos en el protoplasma y provistos a veces de flagelos o cilios mediante los cuales se mueve en un medio líquido. Muchas de sus especies viven en las aguas, dulces o marinas; abundan en sustancias orgánicas, en el suelo y en materias orgánicas en putrefacción; otras son parásitos más o menos patógenas.

Bactericida: Que destruye las bacterias.

Bacteriófago: Virus que posee la propiedad de atacar y destruir las colonias bacterianas.

Bagazo: Residuo lignocelulósico, separado mediante tamizado, resultante de la elaboración de cerveza y malta o de la obtención de azúcar de caña, entre otros. Puede tratarse para usarlo como fertilizante, para la extracción de proteínas, como alimento para el ganado o como combustible.

Bajamar: Mínima altura alcanzada en la costa por el agua durante la marea baja.

Bakelita: Resina de fenol-aldehído.

Bala: Una masa de material de forma paralepipédica o cilíndrica de material para reciclar que se halla atada con flejes de acero o plástico.

Balance de materiales o masas: Principio de física según el cual la masa total de los materiales que entran en un proceso (inputs) es igual a la de los productos, subproductos, residuos y emisiones que salen (outputs).

Balance ecológico: Equilibrio que forman los compuestos de una comunidad natural si sus números relativos permanecen más o menos constantes, esto es, formando un ecosistema estable. Constantemente se producen reajustes progresivos en la composición de una comunidad en equilibrio como respuesta a la sucesión ecológica natural a las alteraciones climáticas y a otras influencias externas.

Ball-clays: Mineral de arcilla correspondiente a la familia de las caolinitas. Mineral de gran plasticidad, muy usada en la fabricación del sanitario. Su nombre deriva, precisamente, de su elevada plasticidad: «arcilla que forma bolas» en contacto con el agua.

Balsa: Espacio totalmente o parcialmente excavado en el suelo y aislado del entorno a través de una obra civil, destinado a la contención de líquidos.

Balsa de decantación: Estanque en el que permanecen las aguas residuales durante el tiempo necesario para que puedan separarse, por gravedad, las materias sólidas o de mayor densidad, que el agua posee en suspensión o mezcladas.

Bambú: Son plantas muy antiguas (mioceno), rústicas y, sobre todo, muy atípicas. Es extraordinariamente útil, habiéndose descrito más de 1.500 usos y utilidades, muy válida en el pasado y con muchas posibilidades en el futuro. Por su dureza y flexibilidad se le llama el acero vegetal. Es un recurso renovable y sostenible. Son originarios de Asia, América, África y Oceanía; pueden adaptarse a numerosos climas (tropicales, subtropicales y templados). El nombre bambú es una onomatopeya de Malasia.

Bancal: Relleno artificial para el cultivo en montañas.

Banco de tierras: Sistema por el cual los poderes públicos financian a los agricultores para que retiren parte de la superficie de su explotación de la producción agropecuaria, a fin de no agravar los problemas de fuertes excedentes de difícil salida. Este sistema, iniciado en los tiempos del New Deal, se ha extendido después a otras áreas distintas de EE UU y especialmente la Comunidad Europea que financia la retirada de tierras del cultivo, para dedicarlas, sobre todo, a la forestación.

Barban: Herbicida translocado del grupo carbamato, que se emplea para eliminar la avena salvaje y otras hierbas en las cosechas de cereales, guisantes y remolacha. Es dañino para los peces.

Barbecho: Tierra de labranza que no se siembra durante uno o varios ciclos vegetativos. Con este sistema, la tierra se recupera, y almacena materia orgánica y humedad. Por derivación de barbecho, se denomina barbechera a la parte de la superficie agrícola que ocupa.

Barboteador: Instrumento utilizado para la toma de muestras de determinados contaminantes atmosféricos que consiste en un recipiente con un líquido a través del cual se bombea el aire para que absorba estos contaminantes.

Barbotinas: Mezcla de arcillsa y agua. La mezcla se introduce en un molino, generalmente de balas, para su trituración. La barbotina se atomiza para su conformado (colado o prensado).

Barniz: Sustancia para el acabado de una superficie metálica o de madera. Suele contener compuestos orgánicos volátiles que se emiten a la atmósfera una vez seca la capa de barniz.

Barochinal: Estado normal de la atmósfera, donde por las variaciones horizontales de densidad hay una distribución distinta de presión a diferentes alturas.

Barra italiana: Instrumento que se arrastra sobre los fondos coralíferos rompiendo el coral con una barra, y recogiendo los fragmentos con una red. Se trata de un método de pesca destructor y con un grave impacto para las comunidades bentónicas.

Barreras absorbentes: Son un medio eficaz y económico para recoger pequeños y medianos derrames de hidrocarburos en aguas tranquilas. Las mejores prestaciones las ofrecen cuando actúan combinadas con una barrera de contención. Van provistas de conexiones rápidas para formar cercos de cualquier longitud.

Barreras reflectantes absorbentes: Superficies pulidas, de vidrio o acero, que reflejan la onda sonora que incideen ellas.

Barro: Residuo de consistencia pastosa con mucha materia inorgánica.

Basalto: Roca de grano fino y composición máfica, es decir, con un alto contenido de hierro. Se compone mayormente de piroxeno y olivino, conteniendo cantidades menores de feldespato y cuarzo. De color oscuro. Es la roca más abundante en la corteza terrestre, formada por enfriamiento rápido del magma expulsado del manto por los volcanes. Por esta razón suele presentar vacuolas y cubrir extensas áreas.

Basura: Residuos sólidos, sean urbanos, peligrosos, etc.

BAT (Best Available Technology): Es una doctrina que determina la adquisición de la mejor tecnología disponible, sin reparar en el «análisis costo beneficio». Esta podría ser la orientación-futura de la estrategia de negocios o la reflexión sobre otros factores como los impactos ambientales.

Batanado: Es uno de los sistemas más tradicionales para ablandar las pieles, de manera de conseguir una piel blanda, uniforme y también desempolvada.

Batería de acumuladores: Agrupamiento de acumuladores eléctricos conectados en serie o en paralelo.

Batimetría: Determinación y estudio de la profundidad de ríos o mares. En la actualidad se realiza con ultrasonidos.

Bauxita: Silicato principal del aluminio. Es una roca constituida por óxidos e hidróxidos de aluminio y hierro del que se extrae el aluminio. Es de color crema con puntos rojos, brillo no metálico, dureza 1 a 3. Las reservas mundiales más importantes se encuentran en Australia, Guinea y Brasil.

Baya: Fruto carnoso que contiene numerosas semillas (tomate, tuna, etc.).

Bayer: Proceso de obtención del aluminio a partir de la bauxita. Véase *Proceso Bayer.*

Becquerel: Unidad de actividad radioactiva equivalente a una desintegración por segundo de un elemento radioactivo.

BEI: Banco Europeo de Inversiones. Ha intervenido en favor de proyectos relacionados con el medio ambiente, como por ejemplo cooperando con el Banco Mundial, desde 1988, en el marco del programa del Medio Ambiente para el Mediterráneo (EPM).

Benceno: Hidrocarburo líquido incoloro, soluble en el alcohol, éter y acetona e insoluble en el agua. Se obtiene del alquitrán de hulla y gas de los hornos de coque. Es muy inflamable y constituye un disolvente para grasas, resinas, etc. En la combustión de motores en lugares cerrados y en procesos industriales se emite en forma gaseosa. Es muy tóxico. La Environmental Protection Agency (EPA) ha comprobado que los niveles de benceno son un 50% más altos en hogares de fumadores. Como componente de la gasolina su contenido ha sido limitado en sucesivas directivas, 85/210 y 87/416, relativas al contenido en plomo de la gasolina; el contenido en benceno de cualquier gasolina no deberá exceder del 5% del volumen desde el 1 de Octubre de 1989.

Bentónicos: Conjunto de organismos vegetales y animales que viven en el fondo del mar.

Bentonita: Mineral de arcilla perteneciente a la familia de las montmorillonitas. Tienen la propiedad de hincharse en contacto con el agua. Por ello se usan en la impermeabilización de vertederos.

Benzo(a)pirenos: Hidrocarburos aromáticos polinucleares que son carcinogénicos capaces de producir cáncer de piel en ratones cuando se aplican durante un considerable período de tiempo y sarcomas cuando se inyectan en forma subcutánea. Se utiliza como marcador de la presencia y el efecto de HAP cancerígenos.

Berma: Ver *Terraza.*

Betún: Componente del asfalto natural procedente del petróleo. Mezcla de hidrocarburos. Se emplea para lustrar los zapatos.

BFRs (Brominated flame retardants): Nombre que se le da a un grupo de sustancias orgánicas que tiene efecto inhibitorio en la ignición de materiales combustibles orgánicos (generalmente plásticos). Son comúnmente utilizados en los productos electrónicos reduciendo la inflamabilidad del producto reemplazando a los PCB en la época de los setenta. Algunos BFRs son considerados contaminantes orgánicos persistentes conocidos por bioacumularse.

Bifenilo policlorado: Compuesto organoclorado formado por dos anillos entrelazados de fenil y entre dos y diez átomos de cloro que sustituyen los hidrógenos.

Bilham, ecuación de: Fórmula que relaciona las precipitaciones de lluvia, con su duración, su altura, su frecuencia e intensidad.

Bioacumulable: Que es susceptible de bioacumulación.

Bioacumulación: El aumento en la concentración de una sustancia en organismos vivos, debido al contacto de éste con aire, agua, o alimento contaminado, debido a la lenta metabolización y excreción.

Bioacumulativas: Sustancias que tienen la capacidad de bioacumularse.

Biocarburante: Combustible producido a partir de residuos y/o vegetales. Existen dos grandes familias los «bioalcoholes» y los «esteres».

Biocenosis: Conjunto de seres vivos que habitan en un biotipo determinado.

Biocida: Elemento químico introducido en el medio ambiente que destruye formas de vida no deseadas. Pueden acumularse a través de la cadena de alimentación con carácter de peligrosidad aguda crónica y dañan de forma selectiva a determinados organismos. Existen biocidas de tres clases: insecticidas, herbicidas y fungicidas.

Bioclimático, sistema: Véase *Arquitectura Ecológica.*

Biocombustible: Combustible apto para su uso en quemadores o motores de combustión interna de origen vegetal (biológico), procedente de recursos renovables.

Biocontrol: Uso de organismos vivos para comprobar la pureza del agua. // Análisis de sangre, orina y tejidos realizados a seres humanos para comprobar el grado de exposición a contaminantes químicos.

Biodegradabilidad: Capacidad de transformación de una sustancia en otras más simples por medio de agentes biológicos.

Biodegradable: Capaz de ser descompuesto rápidamente bajo condiciones y procesos naturales derivando en materias más inocuas. Se refiere a la característica de las sustancias o los productos industriales ~~co~~mo embalajes, detergentes, etc.~~ q~~ue pueden ser destruidos por los microorganismos o bacterias. Vulnerable al ataque de microorganismos en el suelo, mediante la adición de polímeros naturales a la resina plástica, —en caso de los plásticos.~~ E~~sta condición es preceptiva en muchos artículos para evitar la contaminación ambiental. La Directiva 73/405 relativa a los métodos de análisis de la biodegradabilidad en detergentes, y modificada por la D. 82/243, exige un índice medio mínimo al 80% de biodegradabilidad. Adaptación española R.D. 2-2-88.

Biodinámica: Método de jardinería en la que la práctica orgánica se realiza en fase con ciclos estacionales planetarios y lunares. La jardinería biodinámica pretende aumentar las propiedades ventajosas de plantas deseables a la vez que inhibe la actividad de los depredadores. Ideado por Rudolf Steiner (1861-1925).

Biodiverdidad: Véase *Diversidad biológica*.

Bioensayo: Utilización de organismos vivos para medir el efecto de una sustancia, factor o condición, comparando el antes y después del experimento. El término se utiliza generalmente al hablar de experimentación sobre el cáncer.

Bioesfera: Cubierta del planeta ~~Ti~~erra y atmósfera que la rodea ~~q~~ue contiene y sostiene la vida. Se extiende en la atmósfera hasta unos 10.000 metros de altura; en la superficie terrestre hasta sólo pocos metros de profundidad, y en los océanos en su totalidad. Algunos autores distinguen entre biosfera (vida), hidrosfera (aguas), atmósfera (aire) y litosfera (roca, la corteza del planeta). Tal como se utiliza en el ámbito de una vida sostenible, la biosfera incluye la atmósfera, la hidrosfera y la parte de la litosfera que contiene y sostiene organismos vivos.

Biofiltro: Filtro con microorganismos aerobios que elimina el olor de gases y de mezclas malolientes.

Biogás: Conjunto de gases provenientes de la digestión anaerobia de residuos orgánicos. Por término medio está compuesto por metano (2/3 partes) y dióxido de carbono (1/3 parte). Su poder calorífico es muy elevado.

Bioingeniería: Métodos tecnológicos de alcanzar la biosíntesis de productos animales y vegetales, por ejemplo, los procedimientos de fermentación. También ingeniería biológica.

Biolita: Material de relleno poroso que sirve de alojamiento a microorganismos para llevar a cabo la filtración biológica.

Biolixiviación: o biominería. Es un proceso en el cual se emplean microorganismos para recuperar metales como cobre o uranio desde los minerales que los contienen.

Biología molecular: Es la parte de la biología que está dedicada al estudio de los mecanismos moleculares y genéticos implicados en los procesos biológicos fundamentales en el desarrollo y fisiología de los organismos vivos.

Bioma: Región importante de la comunidad terrestre reconocida por los ecólogos, por ejemplo, tundra, pradera herbácea, desierto, bosque templado y selva tropical. Conjunto de comunidades que constituyen una biocenosis.

Biomasa: Es el conjunto de toda la materia orgánica procedente de la actividad de los seres vivos presente en la biosfera. A la parte aprovechable energéticamente se la conoce como biomasa energética o simplemente biomasa. El término biomasa puede sustituirse por el de biota.

Biometal: Medición ambiental. Estudio mesurativo o estadístico de los fenómenos y procesos biológicos.

Biometanización: Tratamiento anaerobio de los residuos que produce metano y residuos orgánicos estabilizados. Este proceso se aplica, en residuos sólidos urbanos (RSU) y sobre fangos de depuradora. La digestión anaerobia es un proceso al que se someten los RSU para obtener de ellos biogás y compost. Esta degradación implica la actuación en serie de unas determinadas familias de bacterias. Posee tres fases: hidrolítica, acetogénica y metanogénica.

Biometanización LINDE-KCA: Digestión anaerobia vía húmeda.

Biomímesis: Dícese de los hábitos humanos que se asemejan al comportamiento de los ecosistemas.

Biomimético: Se refiere a aquellos procesos o materiales que buscan replicar (mimetizar) procesos o materiales naturales.

Biopilas: Proceso de tratamiento de biorremediación que resulta de acopios regulares de suelo, situados sobre un lecho de grava de 10 a 15 cm de espesor, que contienen en su interior tuberías de aireación de PVC, que se colocan durante la construcción. Los tubos están conectados a un soplador para forzar el paso del oxígeno atmosférico a través de las pilas.

Bioplástico: Plástico biodegradable fabricado con almidones de maíz, u otros cereales.

Biopolímeros: Polímeros biológicos como las proteínas y ácidos nucléicos. (Véase *Polímero*). Los biopolímeros se han convertido en materiales atractivos para diversas aplicaciones debido a su compatibilidad medioambiental y sus propiedades naturales y mejoradas a través de técnicas biotecnológicas avanzadas.

Bioquímica: Parte de la química que estudia la composición y las transformaciones químicas de los seres vivos.

Biorreactores de membranas (MBR): combinación de un reactor biológico de fangos activados con un sistema de membranas.

Biorrefineria: Estrategia integral para la valorización de la biomasa.

Biorregión: Regional natural con diversidad y estabilidad, definida por su coherencia ecológica.

Biorremediación: Proceso en el que se emplean organismos biológicos para resolver problemas específicos medioambientales, como la contaminación. Se puede emplear para atacar algunos contaminantes específicos, como los pesticidas clorados que son degradados por bacterias, o bien, de forma más general como en el caso de los derrames de petróleo, que se tratan empleando varias técnicas, incluyendo la adición de fertilizantes para facilitar la descomposición del crudo por las bacterias. Como ventaja de esta técnica hay que citar que se puede emplear en áreas a las que no se puede acceder fácilmente si no es mediante excavación.

Biorremedio: Agente biológico utilizado para degradar los contaminantes de origen orgánico o inorgánico y transformarlos en productos sin efectos ambientales indeseables.

Biosecado: proceso de compostaje anaerobio en túneles de aireados por la parte inferior. La aportación de aire desencadena una serie de reacciones que comportan la elevación de la temperatura y como resultado, la evaporación de buena parte del agua.

Biosólido: Fangos originados en cualquier proceso de depuración de aguas residuales y que son susceptibles de valorización de algún tipo (abono agrícola, ecobrick, etc.)

Biotecnología: Toda aplicación tecnológica que utilice sistemas biológicos y organismos vivos y sus derivados para la creación o modificación de productos o procesos para usos específicos. Estos productos pueden ser de gran variedad, desde medicinas o enzimas industriales hasta procesos de mejora de especies de plantas y animales o desarrollo de microorganismos para usos específicos. La Directiva 90/219 se refiere a la utilización confinada de microorganismos modificados genéticamente. La 90/220 sobre la liberación intencional en el Medio Ambiente de organismos modificados genéticamente.

Biotopo: Hábitat físico ocupado por una determinada biocenosis, parte viva del ecosistema**.**

Biotorre: Torres de tratamiento de aguas residuales o gases, en cuyos soportes (discos, bandejas, platos, etc.) existen lechos bacterianos.

Bioventing o inyección de aire: Tipo de biorremediación. Tratamiento que consiste en la ventilación forzada del suelo profundo mediante la inyección a presión de oxígeno (aire) en la zona no saturada a través de pozos de inyección.

Bisfenol A: Es un derivado con actividad hormonal. Fue descubierto en 1938 junto al dietiletilbestrol, usado aún como tratamiento hormonal. El descubridor, Dodds descartó el bisfenol A porque su actividad era 100 veces menor pero lo clasificó «compuesto estrogénico» es decir, con actividad similar a unas hormonas sexuales femeninas. Décadas después, la industria química recuperó el bisfenol A por su capacidad para polimerizar y conformar plásticos. Actualmente, se encuentra en muchos plásticos. Numerosos estudios en animales afirman que, a bajas dosis, pueden afectar al desarrollo sexual

Blanco de plomo: Carbonato básico de plomo o albayalde. Se usa como pigmento para pintura.

Blister: Material compuesto de aluminio y plástico que se emplea, básicamente, para el envasado de medicamentos.

Bohemita: Mineral integrante de la bauxita.

Boliche: Arte de pesca para la captura de peces menudos. Se trata de una red de cerco de malla muy pequeña, en principio diseñada para la captura del chanquete, de hecho con ella se pescan, sobre todo, inmaduros y alevines de distintas especies.

Bolsa de residuos: Sistema de información y gestión que promueve la venta o cesión de subproductos entre empresas.

Bolsa de Subproductos: Es un servicio gratuito (generalmente por vía electrónica), que tiene como objetivo potenciar el aprovechamiento máximo de los residuos, promover el reciclaje y proporcionar a las empresas una herramienta para reducir gastos y mejorar la competitividad, lo que abarata la adquisición de materias primas de empresas inscritas que ofrecen o demandan

residuos para introducirlos en procesos productivos como materias primas.

Bomba de calor reversible: Aparato que sirve para suministrar aire frío o aire caliente, que utiliza una sustancia con punto de ebullición cercano a la temperatura ambiente, encargada de ceder o ganar calor, a la que se hace circular por un circuito cerrado sometiéndola a ciclos de evaporación-licuación.

Bomba de elevación: Equipo de bombeo utilizado para elevar un fluido.

Bone china: Tipo de porcelana desarrollada en el Reino Unido en donde los huesos de buey calcinados (cenizas de huesos) se emplean en sustitución del feldespato en la formulación de la porcelana. Se caracteriza por ser blanca, transparente y resistente.

Bonos, de carbono: Unidad de compra/venta de emisiones de CO_2 para cumplir con el Protocolo de Kyoto.

Borra: Ripios lixiviados impregnados de solución y otros residuos menores, producidos en la minería. De aspecto gelatinosos generado en el proceso de extracción por disolvente. Su aparición se debe a la presencia de sílice coloidal u otras impurezas sólidas en las soluciones de lixiviación y se establece entre las fases orgánicas y acuosas.

Borujo: Residuo pastoso de la aceituna después de prensarla para extraer el aceite, el cual todavía se somete a una segunda extracción con disolventes.

Bosón: Partícula elemental de la materia. El modelo Estándar Atómico postula que las partículas elementales son: quarks, leptones y bosones.

Botánica: Ciencia que estudia la vida vegetal, tanto referente a la forma de las plantas como su evolución y los fenómenos naturales que en ella ocurren.

Bottom Ash: Cenizas del fondo. (En las incineradoras se denominan simplemente escorias)

Botulismo: Enfermedad producida por la bacteria «*Clostridium botilinum*» que causa muertes en los animales de caza cuando disminuyen las reservas de agua en el estío. La enfermedad afecta a otros animales y al hombre.

BPA (Buenas Prácticas Ambientales): Instrumentos eficaces para la mejora medioambiental de una empresa o institución. Se basan en la realización de una serie de actuaciones cuya finalidad es la mejora del medio ambiente en el lugar de trabajo, reduciendo las pérdidas sistemáticas o accidentales de materiales, en forma de contaminantes (residuos, emisiones o vertidos). De esta manera se aumenta la productividad, sin acudir a cambios en tecnologías, materias primas o productos, sino centrándonos principalmente en factores humanos y organizativos de la producción.

Brea: es un residuo de la pirólisis de un material orgánico o destilación de alquitranes. Es sólida a temperatura ambiente y está constituida por una mezcla compleja de muchos hidrocarburos. Presentan un amplio intervalo de ablandamiento en vez de una temperatura definida de fusión. Cuando se enfría el fundido, las breas solidifican sin cristalización.

Brezal: Formación vegetal constituidas por brezos (géneros Erica y Calluna), enebros, otros arbustos, plantas herbáceas y ocasionalmente árboles. Los brezales suelen desarrollarse en suelos pobres.

Bric: Material compuesto formado por diversas capas de aluminio, papel y plástico que se emplea, básicamente, para el envasado de alimentos líquidos. Existen muchas combinaciones en el número de capas, a veces solo hay dos.

Briquetas: o también denominado «*Bloque sólido combustible*», son combustibles para chimenea, en forma de ladrillo, que sustituyen a la leña. Están hechas con material reciclado, como cáscarilla de arroz, bagazo de caña de azúcar, residuos de pulpa de papel, papel o cartón. Para compactar el bloque sólido combustible se pueden usar aglomerantes.

BRL: Barril, unidad de volumen usada para el petróleo crudo (1 barril = 42 galones = 158,9 litros).

Bronce: Nombre con el que se denominan toda una serie de aleaciones metálicas que tienen como base el cobre, entre un 3-20% de estaño y proporciones variables de otros elementos como zinc, aluminio, antimonio y fósforo. Otros elementos con características de dureza superiores al cobre hacen mejorar sus propiedades mecánicas. El bronce es el elemento sólido más ligero. Por su elevado calor específico, el mayor de todos los sólidos, se emplea en aplicaciones de transferencia de calor. Aleación de cobre y estaño, con algo de zinc.

Brownfields: Industrias y comercios inactivos o abandonados, donde su reutilización o la reactivación de éstas se complica por la presencia, o potencial presencia, de sustancias peligrosas, emisiones o contaminantes.

BSC: (Bolsa de Subproductos de Cataluña). Es un servicio gratuito que tiene como objetivos potenciar el aprovechamiento máximo de los residuos, promover el reciclaje y proporcionar a las empresas una herramienta para reducir gastos y mejorar la competitividad, lo que abarata la adquisición de materias primas y reduce el coste de gestión de los residuos. Se creó en 1992.

BSI: *British Standard Institution*. Es el mayor organismo de normalización del Reino Unido, creado en 1901. Ha sido particularmente activo en el campo del medio ambiente. En 1992 emitió el *standard* ambiental BS7750 que representa uno de los más importantes puntos de referencia en la materia.

BTEX: Acrónimo que viene de: Benzeno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno. Este compuesto es uno de los compuestos orgánicos volátiles (COVs) encontrado en derivados del petróleo como el petrol.

BTU: *British Thermal Unit:* cantidad de calor para elevar 1 ℉ la temperatura de 1 libra de agua. 1 BTU = 252 calorías.

BTX: Componentes aromáticos (principalmente benceno, tolueno y xileno) que se añaden a la gasolina sin plomo para aumentar el índice de octano.

Buenas prácticas de laboratorio: Principios que aseguran una elevada calidad en los envasados, garantizando su comparabilidad y evitando repeticiones en otros estados. Aparecen especificados en la decisión OCDE de 12 de Mayo de 1981. La Directiva 87/18 modificada por la decisión 90/67, impone a los laboratorios de los estados miembros que realicen las pruebas sobre las sustancias químicas respetando dichos principios. // La Directiva 86/609 respecto a la protección de los animales utilizados para experimentación y otros fines científicos, indica que no se realizarán pruebas sobre animales si existe la posibilidad razonable y práctica de recurrir a otro método científicamente aceptable que no implique la utilización de un animal para obtener el resultado deseado. En España el R.D. 223/88 de 14 de Marzo adapta la Directiva 86/609, estableciendo la competencia de las CCAA en la materia, establecimientos de cría, suministradores, registros de animales, etc. La O. de 13/10/89 amplía aspectos administrativos y reglamentos.

Bulking: Conocido también como *Esponjamiento filamentoso* o *Abultamiento*. Fenómeno que ocurre en plantas de fangos activados; el fango llega a volúmenes excesivos y no sedimenta fácilmente. Se aplica a la condición en la que se da una superabundancia de organismos. Agente estructurante, y que permite la entrada de aire, que se añade a la materia fermentable para la fabricación del compost.

Butadieno: Hidrocarburo principalmente usado en la producción de pinturas de látex basadas en agua y cauchos de estireno-butadieno.

Bypass: Vía de derivación que se hace en una tubería de un sistema hidráulico o neumático que permite el funcionamiento de un equipo o un dispositivo cuando la tubería se obstruye.

CAA: *Clear Air Act.* A raíz del primer episodio de contaminación en Londres (1952), son aprobadas por el Parlamento Británico las Actas del Aire Limpio de 1956-1958.

Cabos: Mezclas, residuos de hidrocarburos (que componen los cátodos ya agotados) empleados en la electrólisis de la alúmina.

Cachemira: Piel fina y brillante de color blanco, gris, beig o negra, que procede de la cabra cachemira y que se utiliza para fabricar chales y telas de vestidos de alta calidad.

Cadena de alimentación: Serie de organismos dependientes uno del otro para su subsistencia. La cadena está sustentada sobre la base de los productores (plantas) siendo normalmente menor el organismo consumido que el consumidor. En la cadena de alimentación se diferencian los productores (plantas verdes autótrofas), los consumidores primarios (comedores de plantas o herbívoros) y los consumidores secundarios o carnívoros. Puede llegarse a una acumulación de sustancias tóxicas de toda la cadena, como en el caso de la expansión a nivel mundial del DDT.

Cadena trófica: Conjunto de relaciones de producción y obtención de alimentos que se establece entre los diferentes organismos de un ecosistema.

Cal: Óxido de cal (CaO). Llamada cal viva. Se produce por descomposición del carbonato de cal. La reacción es reversible. La cal apagada es el hidróxido $Ca(OH)_2$.

Calamina: Chatarra de piezas mixtas, formada básicamente por materiales de zinc.

Calcícola: Organismos (animales y plantas) que tienen afinidad por suelos cálcicos.

Calcín: Cascote de vidrio fragmentado, acondicionado o no para la nueva fusión del vidrio.

Calcinación: Proceso de someter un material a un efecto prolongado de calentamiento a alta temperatura. // Operación de calentar los minerales para eliminar el agua y descomponer los carbonatos.

Calcinas: Producto obtenido en la etapa de la tostación.

Calicata: Excavación de una o más caras verticales que tiene por objeto examinar el perfil, la naturaleza y las características del suelo.

Caliche: Grano de carbonato cálcico que se halla mezclado con la arcilla de interés cerámico. Durante la cocción se transforma en óxido de cal y, a la salida del horno, vuelve a hidratarse provocando una reacción exotérmica que puede destruir la cerámica.

Calidad del agua: Características del agua en relación con su potencial uso, el cual disminuye progresivamente a medida que aumenta la concentración de contaminantes.

Calidad del efluente: Conjunto de características de parámetros de calidad de las aguas residuales depuradas.

Calor de condensación: Calor asociado al cambio de estado de una sustancia cuando ésta pasa de estado gaseoso al líquido.

Calor específico: Cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de la unidad de masa de una sustancia en un grado

Calor latente: Calor asociado al cambio de estado de una sustancia, de sólido a líquido o de líquido a gas, sin variación de temperatura.

Calor sensible: Calor asociado al cambio de nivel térmico de una sustancia. Depende del calor específico y de la temperatura.

Caloría: Unidad de energía térmica equivalente a la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de un gramo de agua en un grado centígrado de 14,5 ℃ a 15,5 ℃ a presión normal (1 cal = 4,184 julios).

Cama: Sustancia absorbente en el que se hallan estabulados los animales. Originalmente suele ser de serrín, cortezas poco duras, cascarilla de arroz, etc. Cuando se renueva, constituye un residuo ya que la cama está saturada de deyecciones.

Cámara de aire: Componente que retiene el aire dentro del neumático. Actualmente los vehículos a motor usan neumáticos sin cámara, que son más resistentes a pinchazos. En los neumáticos de las bicicletas aún se siguen utilizando cámaras aunque también pueden encontrarse en el mercado neumáticos sin cámara.// Espacio vacío entre dos paredes. Cuando la separación entre ambas es del orden de 10 centímetros, actúa como aislante térmico.

Cámara de combustión: Parte de un hogar de caldera dentro de una instalación térmica en el que se efectúa la combustión de los productos volátiles y gaseosos del combustible.

Cámara de postcombustión: Zona de una instalación donde se mantienen las condiciones de temperatura, tiempo de permanencia y exceso de oxígeno necesarias para asegurar la completa combustión de los gases.

Cámara de sedimentación: Recinto donde se separan las partículas de un fluido por la acción de la gravedad.

Cambio climático: Cambio en el clima debido a la creciente concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera como CO_2, CFC, NO_2 y CH_4. Este cambio se traduce en frecuentes situaciones meteorológicas extremas, subidas del nivel del mar, olas de calor y de sequía, etc.

Campo de lixiviación: Sistema de tuberías abiertas que conducen el agua desde un tanque séptico al suelo de los alrededores.

Campo difuso: Campo acústico en el cual el nivel de presión acústica es igual en cualquier punto.

Canal: Conducción a cielo abierto para transportar agua desde un punto a otro siguiendo las líneas de nivel y con una ligera pendiente.// Cuerpo de los animales después del sacrificio desprovisto de vísceras abdominales o torácias.

Canchal: Lugar de acumulo superficial de fragmentos rocosos frecuente en zonas de depósito glacial.

Canfeno: Hidrocarburo de origen natural que se emplea junto con el cloro para la fabricación del toxafeno, neurotoxina usada en insecticidas.

Canon de saneamiento: Tributo de carácter finalista destinado al financiamiento del Plan de Saneamiento, que grava el consumo real o potencial de agua en función de la contaminación que puede producir cuando proviene de captaciones de aguas superficiales o subterráneas o de pluviales recogidas por el usuario.

Canon de vertido: Cantidad que debe pagarse por el vertido de una cantidad de líquido. El procedimiento para calcularlo está recogido en el capítulo II, artículos 289 a 295 del Reglamento del Dominio Público Hidráulico y en la O. de 19.12.89.

Cantera: Sitio a cielo abierto de donde se extraen minerales no energéticos. Cuando son subterráneos se denominan minas.

Cáñamo: (nombre científico: *Cannabis sativa*) Especie vegetal originaria de Asia que posee fibras blancas y blandas de 0,9 a 1,8 m de longitud. Es más basto que el lino, pero es más fuerte, más brillante y más duradero que el algodón.

Cañones submarinos: Formas erosivas bajo el mar. Comienzan en el límite de la plataforma continental, tienen paredes casi verticales y pueden llegar a ser muy profundos. Suelen localizarse en la prolongación de grandes ríos, o seguir líneas estructurales (fallas).

Cañote: Residuo del tallo resultante de la recolección del maíz, que puede ser empleado como combustible o como materia prima para elaboración de alcoholes.

Caolín: Arcilla blanca muy pura que se utiliza para la fabricación de porcelanas y de aprestos para almidonar. También es utilizada en ciertos medicamentos y cuando la materia no es muy pura, se utiliza en fabricación de papel.

Caolinitas: son una extensa familia cuyos miembros más. importantes son: caolín, «Ball clay», «fire clay».

CAP: Centros de Asistencia Primaria Sanitaria de España.

Capa de ozono: Una de las capas gaseosas que integran la atmósfera y que absorbe rayos ultravioletas procedentes del sol nocivos para la vida. La destrucción de esta capa está producida por la ruptura de ciertos CFC que reaccionan en la estratosfera destruyendo catalíticamente las moléculas de ozono.

Capa límite: Capa de la atmósfera adyacente a la superficie terrestre, de un espesor aproximado de hasta 1.000 m.// En hidrodinámica: capa de aire en contacto con una pared.

Capacidad de carga: Capacidad de un ecosistema de mantener organismos satisfactoriamente, y al mismo tiempo conservar la propia productividad, adaptabilidad y capacidad de renovación. En la gestión de zonas de vida salvaje este término se refiere al número máximo de animales que un área puede sustentar en un determinado periodo de tiempo sin determinarse. Por extensión se refiere en zonas de ocio al uso que puede realizarse de ella sin causar deterioro de su calidad. Véase *Capacidad de acogida*.

Capacidad de intercambio de cationes: Capacidad de un suelo para absorber cationes intercambiables.

Capacidad de transporte: Número máximo de especies a que un área determinada puede dar soporte durante la época más austera del año, o el máximo de biomasa que puede mantener indefinidamente.

Capacidad del campo: Porcentaje en peso o en volumen del agua que queda en un suelo 2 o 3 días después de haber estado saturado de agua, y una vez que el drenaje libre puede darse prácticamente por acabado.

Capacidad regenerativa: Capacidad de alcanzar de nuevo un determinado estado biológico tras haber sufrido una perturbación.

Capellón: Piel de tierra que se deja adherida a las raíces de los vegetales para transportarlos.

Caprolactama: Fibra polimérica derivada del petróleo. Más resistente que el Nylon 6. Muy empleada para fabricar moquetas.

Captación de agua: Acción de sacar agua de una fuente, lago, río, pozo o mar con la finalidad de alimentar un abastecimiento de agua, una acequia, una presa, un circuito industrial, etc.

Caracterización de residuos: Determinación del tipo, composición y proporción de los diferentes compuestos de una muestra de residuo. La caracterización de los residuos puede servir para clasificar los residuos como inertes, no especiales o especiales, determinando el poder calorífico, la vía más correcta de gestión, su aplicación más correcta, etc.

Carbamato: Compuestos orgánicos utilizados como herbicidas, fungicidas e insecticidas. Son poco tóxicos para los mamíferos y se mantienen en el suelo por poco tiempo. En este grupo se incluyen los carbamatos (Clorprofam, Carbaryl, Barban, Asulam) y los trocarbamatos y ditiocarbamatos (Dialato, Trialato, Zineb, Maneb, Metamsodio).

Carbaryl: Insecticida sulfurado de contacto, regulador del crecimiento vegetal, eliminador de lombrices de tierra. No es tóxico para los mamíferos.

Carbón: Combustible fósil que se origina a partir de la descomposición en un medio anaerobio de restos de vegetales. Según su contenido en carbono los carbones se clasifican (de forma decreciente): antracita, hulla, lignito y turba.

Carbón activado: Carbón amorfo, en polvo o granulado, caracterizado por una gran superficie específica a causa de su porosidad, utilizado como adsorbente de determinados gases, vapores, líquidos y sólidos coloidales.

Carbón activo: Véase *Carbón activado*.

Carbón vegetal: Sustancia carbonosa resultante de la pirólisis (combustión parcial y con un poco de aire) de la leña. Tiene propiedades adsorventes.

Carbonato cálcico: Compuesto químico de fórmula CO_3Ca, muy abundante en la naturaleza y se presenta en diversos grados de pureza y distintos sistemas cristalinos.

Carbono 14: Isótopo radiactivo del carbono. El C 14 se utiliza como marcador radiactivo de sustancias químicas. Su determinación en materiales orgánicos antiguos, subfósiles y fósiles permite determinar la edad en años. Este método desarrollado por W.F. Libby en 1948, fue la primera técnica de datación absoluta por isótopos radiactivos.

Carbono: Elemento con peso atómico 14 (símbolo C). Fundamento de la materia orgánica. Muy abundante también en el reino mineral y en la atmósfera en forma de CO_2.

Carbono orgánico total: Parámetro que mide la cantidad de carbono orgánico presente en la materia orgánica que se encuentra disuelta o en suspensión en el agua.

Carbunión: (Federación Nacional de Empresarios de Minas de Carbón), es una asociación sin ánimo de lucro que agrupa a los productores de carbón, con sede en Madrid. Entre sus objetivos está el estudiar y promover las medidas necesarias para el mejor desarrollo de la industria extractiva del carbón.

Carburante: Combustible líquido utilizado en los motores de explosión.

Carcasa: Estructura básica de un neumático. Resto de un animal muerto.

Cárcavas: Formas erosivas, a modo de hendidura o excavación del terreno, producidas por las aguas de arrollada.

Carcinogénico: Agente del que se ha probado experimentalmente su capacidad para inducir o producir cáncer en humanos o animales. Los agentes carcinogénicos pueden ser físicos (ciertos tipos de radiación) o químicos, entre los que existen numerosas sustancias.

Carcinógeno: Sustancia que puede causar o contribuir a la aparición de cáncer. Pueden ser algunos hidrocarburos como el benzopireno, asbestos, monocloruro de vinilo, aceites pesados, sustancias radioactivas, etc.

Cardo (*Cynara cardunuculus*): Planta de rápido crecimiento y perenne cuyo cultivo lignocelulósico permite producir biomasa par la obtención de energía o como materia prima para producir combustible.

CARDS (Centros Autorizados de Recepción y Descontaminación de Vehículos): Son instalaciones ubicadas en todo el territorio nacional, homologados por las autonomías, en los que se deberán depositar todos los vehículos fuera de uso. En estos centros se procede a descontaminar y eliminar líquidos y gases, y a separar todos los materiales del coche para que cada residuo sea enviado a un gestor autorizado para su reciclaje o valorización.

Carga: (en Pintura y Plástico). Sustancia añadida a una pintura como relleno para darle cuerpo, por ejemplo, barita, caolín, creta, yeso, blanco de España. // En adhesivos de resinas sintéticas, sustancia añadida para ahorrar adhesivo o para ajustar la viscosidad.

Carga contaminante total (COT): Suma de contaminantes orgánicos.

Carga contaminante: Cantidad de polución indicada en alguno de sus parámetros más significativos (DBO, DQO, MES, MI, etc.).

Carga crítica: Estimaciones cuantitativas del grado de exposición a uno o varios agentes contaminantes por debajo del cual, según los conocimientos actuales ciertos componentes del medio ambiente no padecen efectos nocivos significativos. Estos tiene lugar cuando se superan los valores críticos de presencia de compuestos químicos en suelos forestales y en aguas continentales.

Carga hidráulica: Caudal (m^3) por unidad de superficie y de tiempo.

Carga Orgánica (OLR): Cantidad de materia orgánica, generalmente medida como DBO5, aplicada a un proceso de tratamiento dado; expresada como peso por unidad de tiempo por unidad de superficie o por unidad de peso.

Carga térmica: Cantidad de calor a añadir o eliminar del local, por el equipo de acondicionamiento o calefacción.

Carinata: Arbusto del que se obtiene una semilla para la producción de biodiesel de mayor producción, en terrenos semiáridos, que la colza.

Carnaza: Residuo procedente de la industria del curtido de la piel, consistente en la carne que se separa del cuero en piel en la operación de descarnaza, que se aprovecha para fabricar proteínas para piensos. De las carnazas se recuperan dos productos: la grasa, que se utilizará para aplicaciones industriales, y la proteína en forma de hidrolizado, que se utilizará principalmente como fertilizante. Otra posbilidad sería producir metano mediante digestión anaerobia en una planta de biogás. En este caso debería mezclarse con otros prodcutos orgánicos.

Carófitos: Grupo de algas pluricelulares muy antiguo, de aguas dulces o salobres. Se distingue en ellas un eje vertical con entrenudos y nudos alrededor de los que se observan ramificaciones verticiladas. Sus membranas suelen estar calcificadas.

Carrizo: (*Phalaris arundinacea*), es una planta especialmente valorada en los países nórdicos donde se la considera una importante fuente sostenible de fibras cortas para la industria papelera.

Cárstico: Ver *kárstico*.

Cartografía de la vegetación: Método científico de preparación, trazado de mapas y captación de fotografías aéreas de vegetación. Está unida a la ordenación del territorio, la catalogación y gestión de los recursos naturales, la prevención de riesgos y la conservación de la naturaleza. Permite unificar los criterios sobre el estado de los bosques, observación y coordinación del estudio de la desertificación.

Cartón presspan: Cartón prensado, muy liso y compacto, de gran cohesión entre las capas, perfectamente plano, con mucha rigidez y elasticidad, de densidad aparente superior a 1,15 y de resistencia mecánica elevada.

Cas, número (Chemical Abstract Service): Sustancias susceptibles de figurar en la lista O o lista negra de la Directiva relativa a la contaminación causada por determinadas sustancias peligrosas vertidas en el medio acuático de la Comunidad.

CASCADE: Es una red europea que pretende la coordinación permanente y la integración de la investigación europea sobre los efectos en la salud humana de compuestos químicos en los alimentos.

Cascotes: material cerámico cocido que por motivos de control de calidad no pasó los controles./Fragmento de alguna construcción derribada o en ruinas.

Catabolismo: Generación de energía cinética (reacción exotérmica) de degradación de materia orgánica.

Catalizador: Sustancia que permite la aceleración o retardo de una reacción química. No experimenta por sí misma la menor alteración química, o puede recuperarse cuando se ha complementado la reacción.

Catalizador de tres vías: Convertidor catalítico proveído de un soporte cerámico recubierto de metales nobles, como el platino, el rodio o el paladio, que favorece simultáneamente la oxidación de hidrocarburos y monóxido de carbono, y la reducción de los NOx a nitrógeno.

Catecol: El grupo catecol es un radical formado por un anillo bencénico con dos grupos hidroxilo (-OH) en posición, 3 y 4.

Categoría de productos: Productos que sirvan para fines similares y que tengan usos equivalentes. Se denominan así los materiales, similares, para ser estudiados para el posterior otorgamiento de un distintivo de calidad o etiqueta ecológica.

Catena: Término que hace referencia a la relación existente entre la ladera de una montaña y sus suelos asociados, es sinónimo de «toposecuencia».

Catión: Ión de un electrolito que transporta carga positiva.

Cátodo: Electrodo al que se dirigen los iones positivos o cationes.

Cauce: Zona del terreno cubierta por las aguas en las máximas crecidas ordinarias de las corrientes naturales.

Caucho: Hidrocarburo que se obtiene del látex. De esta forma es pegajosa y quebradizo en frío. Cuando se amasa con azufre se torna flexible: se ha vulcanizado.

Caudal: Volumen de agua que fluye a través de una sección determinada en la unidad de tiempo. Véase *Escorrentía*.

Caudal de equipamiento: Caudal óptimo de funcionamiento de una central hidroeléctrica, para él están dimensionados todos los equipos e instalaciones.

Caudal de servidumbre: Caudal que es necesario dejar en el río para abastecer otros usos prioritarios del agua, o bien, para respetar otras concesiones anteriores a la instalación de la central hidroeléctrica.

Caudal ecológico: Caudal mínimo que por motivos ecológicos, es necesario dejar en el río. Este caudal no se puede desviar para ser turbinado. En particular en España, el largo estiaje de los ríos hace necesario el establecimiento de un mínimo o caudal ecológico.

Caudalímetro: Dispositivo que sirve para medir el caudal de un fluido.

Cavitación: o aspiración en vacío. Es un efecto hidrodinámico que se produce cuando el agua o cualquier otro fluido pasa a gran velocidad por una arista afilada, produciendo una descompresión del fluido. Puede ocurrir que se alcance la presión de vapor del líquido de tal

forma que las moléculas que lo componen cambian inmediatamente a estado de vapor, formándose burbujas o, más correctamente, cavidades. Las burbujas formadas viajan a zonas de mayor presión e implotan (el vapor regresa al estado líquido de manera súbita, «aplastándose» bruscamente las burbujas) produciendo una estela de gas y un rápido desgaste de la superficie que origina este fenómeno.

CBC: Cenizas del Bagazo de Caña.

CCAT: (Transporte de Corriente Continua a Alta Tensión) Permite que la corriente esté disponible a grandes distancias con menores pérdidas.

CDS: Comisión de Desarrollo Sostenible de la UE.

CE: (Eficacia de la combustión). Parámetro que sirve para medir la eficiencia de una combustión. En tanto por uno equivale al cuociente $CO_2/(Co_2+CO)$.

Cefle: European Chemical Industry Council. Federación europea de las asociaciones de las empresas químicas de quince países. Tiene domicilio en Bruselas.

Celda de putrefacción: Recipiente para la fermentación de materias orgánicas con entrada y salida de aire artificial mediante el cual se acorta el proceso de degradación.

Celofán: Largas cadenas cristalinas de celulosa. Se usa como material de embalaje.

Célula solar, célula fotovoltáica: Elemento de silicio en el que se verifica la transformación de la luz solar en energía eléctrica.

Celulosa: La más complicada de las poliosas; se halla formando las paredes de las células en todas las plantas. La principal procedencia de la celulosa está en la madera, algodón y otros minerales fibrosos (lino, cáñamo, etc.). La celulosa pura se obtiene eliminando toda lignina, resina y otras materias orgánicas, mediante tratamiento con álalis, ácidos, sulfuro sódico, etc. Es la materia prima para fabricar papel, seda artificial, lacas de celulosa y películas.

CEMA: (Centro para la Empresa y el Medio Ambiente): Antiguamente llevaba el nombre de Centro de Iniciativas para la Producción Limpia, es una herramienta del Departamento de Medio Ambiente de la Generalitat de Cataluña creado en el año 1994. Su objetivo principal es el de promover, impulsar y asesorar a las empresas a la hora de adoptar prácticas, técnicas y tecnologías encaminadas a prevenir en origen la contaminación. También tiene como misión el difundir el concepto de Producción más Limpia.

Cementación: Técnica de recuperación de metales del agua en la que el efluente a tratar (con iones metálicos disueltos) se pone en contacto con el metal más activo (generalmente el hierro) para recuperar los elementos más oxidantes que éste, como son el cobre y la plata. La reacción se lleva a cabo en un medio ácido.

Cemento: Los cementos contienen óxido de cal (CaO), sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3), pequeñas cantidades de hierro (Fe_2O_3) y óxido magnésico (MgO). La Directiva 84/360, relativa a la lucha contra la contaminación atmosférica procedente de las instalaciones industriales, exige una autorización previa a la explotación de industrias de productos minerales no metálicos ~~ce~~mento. ~~E~~s la mezcla de clínquer con yeso y otras sustancias, como cenizas volantes.

Cemento de escoria: Cemento artificial obtenido granulando escoria de los altos hornos, enfriándola en el agua y luego moliéndola con cal, que proporciona propiedades hidráulicas.

Cemento Sorel: Mezcla de óxidos de magnesio (a veces dolomía) y cloruro de magnesio.

CEN: (Comité Européen de Normalization): Es una de las principales entidades de normalización europeas. Colabora con otros organismos europeos nacionales e internacionales, entre los cuales está el ISO.

Ceniza de fondo: Residuo no transportado por los gases del horno. Cenizas que quedan en el fondo de la parrilla, y a veces en la caldera, durante una incineración.

Ceniza volante: Partículas de naturaleza amorfa no combustibles arrastradas por los gases de combustión. Pueden contener contaminantes como restos de combustible que no se hayan quemado completamente y metales procedentes del combustible.

Ceniza volcánica: Es una composición de partículas de roca y mineral muy finas (de menos de dos milímetros de diámetro) eyectadas por un viento volcánico. La ceniza se genera a partir de la roca cuarteada y separada en partículas diminutas durante un episodio de actividad volcánica explosiva.

Cenosferas: Diminutas esferas alojadas a su vez en el interior de otras esferas (normalmente cenizas volantes).

Central eólica: Central eléctrica que aprovecha la energía del viento.

Central fluyente: Central hidroeléctrica que carece de embalse regulador.

Central fotoeléctrica: Conjunto de instalaciones destinadas al suministro de energía eléctrica a la red mediante el empleo de sistemas fotovoltaicos a gran escala.

Central geotérmica: Central eléctrica que aprovecha la energía térmica del subsuelo y la explotación de los yacimientos geotérmicos.

Central heliotérmica: Central solar que aprovecha la radiación solar para calentar un fluido que, al vaporizarse, se puede utilizar para mover un grupo turbogenerador.

Central hidroeléctrica e hidráulica: Conjunto de instalaciones que mantiene generadores accionados por turbinas hidráulicas, transforman la energía potencial de un curso de agua en energía eléctrica.

Central maremotriz: Central eléctrica que retiene el agua, por medio de unos muros, en un estuario o bahía generalmente naturales, y que transforma la energía

potencial del agua inherente a una altitud determinada por la intensidad de la marea en energía eléctrica.

Central reversible: Son aquellas centrales de generación de energía eléctrica que disponen de dos embalses. Durante el día funcionan normalmente y por la noche, cuando el precio de la energía es barato, se bombea agua hasta el embalse superior.

Central solar: Central eléctrica que utiliza la energía radiada por el sol para producir energía.

Central termoeléctrica o térmica: Estación generadora de electricidad en la cual los transformadores de energía son turbinas de vapor o motores de combustión. Las emisiones aparecen reguladas en la Directiva 88/609 (Sec. 1.-10); en relación a la depuración de partículas mediante electrofiltros, desulfuración de los gases de combustión y altura de las chimeneas.

Centrífuga: Es un aparato que aplica una fuerza centrífuga sostenida (esto es, una fuerza producida por rotación) para impulsar la materia hacia afuera del centro de rotación. Este principio se utiliza para separar partículas en un medio líquido por sedimentación.

Centrifugar fangos: Separar mecánicamente los componentes de un lodo de densidades o volúmenes diferentes (sólido-agua) aplicando la fuerza centrífuga.

Centro: Emplazamiento en el que se llevan a cabo, en un lugar determinado, actividades industriales bajo el control de una empresa, incluyendo el almacenamiento conexo o asociado de materias primas, subproductos intermedios, productos finales y material de desecho, así como las infraestructuras y equipos, ya sean fijos o no, relacionados con las mismas.

Cepa: Cultivo de microorganismos.

CER (Catálogo Europeo de Residuos): Listado europeo de sustancias, materiales o elementos que son considerados como residuo. Fue establecido en virtud del la La Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos, en el artículo 3.a y aprobado por las Instituciones Comunitarias mediante la Decisión 94/3/CE, de la Comisión, de 20 de diciembre de 1993.

Cera: Sustancias sólidas que segregan las abejas. Tradicionalmente se emplea como endulzante y para la fabricación de velas. Las llamadas cera del petróleo, derivan del petróleo y son una mezcla de hidrocarburos saturados. Ceras sintéticas, que se obtienen mediante una síntesis de Fischer-Tropsch.

CERCLA: (Comprehensive Environmetal Response, Compensation and Liability Act.). Legislación estadounidense de 1980, generalmente conocida como «*superfound*». Fija normas de responsabilidad civil objetiva para los daños causados al medio ambiente con criterios de retroactividad.

CERES: (Coalition For Environmentally Responsible Economies). Asociación de inversores institucionales y de grupos del medio ambiente con base en Massachussets, EE UU. Se debe al CERES la creación de los llamados «Principios de Valdez», principios voluntarios relativos al comportamiento ambiental de las empresas. El nombre Valdez proviene del Exxon Valdez, el petrolero norteamericano que dañó gravemente los alrededores de la costa de Alaska en marzo de 1989, dando origen a uno de los mayores desastres ecológicos contemporáneos.

Cermet: Productos fabricados con combinaciones de cerámicas y metales.

Certificación energética de edificios: Es una herramienta que incide tanto en la mejora de la eficiencia energética, como en la promoción de energías renovables y, de una manera más indirecta, en la mejora del uso de la vivienda, dando una «nota» de eficiencia energética a edificios nuevos y existentes. Así, se premiará a los edificios mejor aislados, con instalaciones más eficientes y que utilicen energías renovables, etc. Se facilitará esta información a los usuarios del edificio (propietarios o inquilinos) y, a su vez, se darán recomendaciones para poder mejorar la «nota», es decir, la eficiencia energética de sus viviendas. Se prevé que esta «nota» se simbolice de forma muy parecida a la certificación de eficiencia energética de electrodomésticos que ya existe en la actualidad.

CESIC: Consejo Superior de Investigaciones Científicas de España.

CFC: Véase *Clorofluorocarbonos*.

Chabazita: Mineral de arcilla perteneciente a la familia de los zeolitas.

Chamota: Materiales cerámicos, fabricados a partir de arcillas caoliníticas, que han sido cocidos, molidos y reducidos a granos de varios grosores y se utiliza como desgrasante.

Chancado: proceso mediante el cual se disminuye el tamaño de las rocas mineralizadas triturándolas en chancadoras y molinos. El material extraído pasa por tres tipos de chancadoras (chancador primario, secundario y terciario) hasta llegar a tamaños muy pequeños.

Char: nombre que se usa para denominar al coque.

Chatarra: Restos producidos durante la fabricación o consumo de un material o producto. Se aplica tanto a objetos usados, enteros o no, como a fragmentos resultantes de la fabricación de un producto. Se utiliza para designar metales y/o aleaciones.

Chatarra electrónica: Componentes de PC, TV, teléfonos móviles y equipos de audio obsoletos los que algunos pueden contener materiales reciclables o reutilizables.

Chernocem (Tierra negra): Suelo de terrenos pastizales que se encuentra en áreas frescas subhúmedas hasta zonas templadas donde el humus permanece cerca de la superficie y aparece una capa gradualmente más oscura (negra o gris) donde se ha acumulado la cal. La vegetación natural que acompaña al chernocem la constituyen las hierbas con tallo, este tipo de suelo se encuentra en la estepa rusa en las grandes llanuras de América del Norte y en la pampa Argentina.

Chikungunya: Enfermedad tropical, endémica en África, que se transmite por la picadura del mosquito *Aedes Aegypti*.

Chilodonella: Tipo de ciliado (protozoo) que se alimenta de bacterias.

Chimenea: Conducto de salida al exterior de los humos, gases y partículas generadas por una combustión, una reacción química o un almacenaje de productos, o bien que responde a las necesidades de ventilación de una actividad.

Chimenea de las hadas: Pináculo que se forma generalmente en depósitos incoherentes, de origen morénico, volcánico, etc., a la punta de la cual se mantiene un bloque rocoso que, temporalmente, protege de la erosión las pendientes casi verticales del pináculo.

Chimeneas de ventilación: Bocas de salida de lavas volcánicas en el fondo del océano. Calientan las aguas próximas lo que permite una rica flora y fauna.

Chupona: Nombre común que se refiere a los elementos de bombeo de aguas residuales de un pozo (pozos ciegos) y, a veces, a los mecanismos de succión de los sistemas de recogida neumática de los RSU**.**

CIA: *Chemical Industries Association*. Las iniciales indican las asociaciones de emprendedores de la industria química en el Canadá y en el Reino Unido.

Cianobacteria: O algas verdeazuladas. Organismos que absorben el hidrógeno y liberan oxígeno, muy abundantes hace miles de millones de años.

Cianuro: Sales de ácido cianhídrico (CNH). Los cianuros alcalinos y alcalinotérreos son muy solubles y venenosos. Para destruirlos se someten a alta presión y elevada temperatura.

CIC: Compuestos Intermedios de la Combustión. Compuestos que se generan en procesos de combustión.

CIC: Véase *Capacidad de Intercambio de Cationes*.

Ciclo biogeoquímico: Descripción de procesos geológicos y biológicos que afectan a un elemento de un ecosistema.

Ciclo de agua: Sucesión temporal de los diferentes cambios de lugar y de estado por los que atraviesa el agua.

Ciclo de Milankovitch: Proceso en que este investigador relacionó la cantidad de CO_2 presente en la atmósfera con los cambios de los continentes, los cambios solares y el comportamiento de los océanos.

Ciclo de nitrógeno: Circulación de los átomos de nitrógeno a través de los distintos ecosistemas, llevado a cabo principalmente por organismos vivos. Los compuestos de nitrógeno inorgánico (principalmente nitratos) son transformados en compuestos nitrogenados pasan a sus cuerpos y sus productos de excreción los devuelven al suelo o al agua. La fijación de nitrógeno aumenta la producción de nitrógeno orgánico. Las bacterias nitrificantes convierten el nitrógeno orgánico en nitratos, que son aprovechados de nuevo por las plantas verdes, las bacterias desnitrificantes convierten algunos de los nitratos en nitrógeno atmosférico.

Ciclo del carbono: Ciclo biológico esencial de la respiración animal y vegetal y que contribuye además al mantenimiento de las constantes atmosféricas y climáticas necesarias para la vida en la Tierra.

Ciclo Otto: Ciclo termodinámico ideal que sirve en los motores de combustión interna provisttos de bujías. Se caracteriza por ser un proceso en el cual la combustión de la mezcla aire-combustible se produce a presión aproximadamente constante (expansión adiabática) dado que el pistón se desplaza hacia abajo mientras se realiza. Hay dos tipos de motores Otto, los motores de dos tiempos y los motores de cuatro tiempos. Éste, junto con el motor diésel, es el más utilizado en los automóviles ya que tiene un buen rendimiento y contamina mucho menos que el motor de dos tiempos.

Ciclón: Borrasca, régimen de vientos. Concentración de bajas presiones. Giran en sentido antihorario y hacia adentro. // Colector mecánico que separa las partículas de un fluido mediante la fuerza centrífuga.

Ciclopentano: Cicloalcano. A temperatura ambiente se presenta como un líquido incoloro. Es un compuesto muy inflamable, peligroso para el ambiente. Su fórmula química es C_5H_{10}

CIEM: Consejo Internacional para la Exploración del Mar. Compuesto por 18 países miembros, se propone promover, publicar y distribuir investigaciones para el estudio del mar. Areas de interés: el Océano Atlántico y los mares adyacentes y en especial el Atlántico Norte.

CIEMAT: Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. Es un organismo público de investigación y desarrollo tecnológico español que depende del Ministerio de Educación y Ciencia.

Cinabrio: Mineral de mercurio (Sulfuro de mercurio).

Cinturón verde: Conjunto de parques, jardines, arbolado, etc., que rodea una ciudad. Si se trata de un cinturón cerrado que no provoca intercambio de aire entre el centro y la periferia, su utilidad es muy limitada.

Cites de Washington: Convenio de especies amenazadas 3/3/79; exige un permiso de exportación para los especímenes, animales o vegetales amenazados, prohibiendo el comercio de aquellos en directo peligro de extinción. El reglamento 3626/82 y sus sucesivas modificaciones, la última 197/90, pretenden aplicar de manera uniforme del Convenio (CITES). En relación a las especies amenazadas, Directivas 79/409 relativa a la conservación de las aves silvestres; los Reglamentos 348/81 y 3786/81 relativos a un régimen común aplicable a las importaciones de productos derivados de los cetáceos; Directiva 83/129, modificada por las directivas 85/444 y 89/370, relativa a la importación en los estados miembros de pieles de determinadas crías de foca y productos derivados; Reglamento 2496/89 relativo a la prohibición indefinida de importación y comercialización del elefante africano.

Citocromo: Enzima metabólica que sirve como bioindicador medioambiental para detectar el grado de introducción de pesticidas en las cadenas alimentarias.

Citoestático: Residuos sanitarios tipificados en normativas especiales. // Fármaco que detiene la división de las células o su crecimiento en inhibirse la mitosis.

Clarificador: Véase Decantador secundario.

Clausura de vertedero: Cierre definitivo de un vertedero con el fin de impedir su uso.

Clima: El conjunto de las condiciones atmosféricas medias de un lugar. Estas comprenden la temperatura media diaria, las temperaturas también diarias máximas y mínimas, el valor medio de la humedad, los porcentajes de nubosidad, sol y lluvia, y la dirección y velocidad de los vientos, todo medido por meses y año. El clima depende de la latitud, de la situación respecto de los océanos y continentes y de las condiciones geográficas del lugar.

Clima mediterráneo: Clima propio de la región mediterránea, pero que se encuentra también en áreas reducidas en otras partes del mundo y que corresponde al clima de buena parte de la Península Ibérica. Se caracteriza por una estacionalidad marcada, con máximo estival de temperaturas y precipitaciones distribuidas en otoño-invierno y primavera y con déficit hídrico (sequía) estival de duración variable.

Clínquer: Producto que se obtiene de calcinar los principales constituyentes del cemento hasta la fusión parcial, antes de triturarlos y añadirle otras sustancias.

Clophen: Nombre comercial de compuestos organoclorados (PCB's).

Cloque: Tipo de cubo de grúa que tiene mas de dos dientes.

Cloración: Aplicación de cloro al agua doméstica industrial o residual para desinfectar u oxidar compuestos no deseados. Forma parte del proceso de desinfección y potabilización en el tratamiento del agua. El cloro no es un constituyente natural de las aguas; el que se agrega al agua para su desinfección actúa tanto sobre las materias orgánicas como sobre las minerales, y para aprovechar su acción germicida con fines de desinfección y, mediante la adición de un ligero exceso, para prevenir futuras contaminaciones. La cloración desinfecta pero no esteriliza; destruye los organismos patógenos pero no los saprófitos.

Clordano: Insecticida clorado seleccionado como peligroso por la CEE, del que no se ha estimado necesario elaborar propuestas porque no es fabricado en Europa ni utilizado a cierta escala.

Clorinas: Emisión producida cuando los rayos de sol actúan sobre los CFC, compuestos químicos, en la estratosfera. Altísima estabilidad molecular que ataca el ozono.

Cloritas: Son minerales de origen metamórfico de interés cerámico que cristalizan en el sistema monoclínico y que se encuentran en forma de láminas flexibles de color verde. Son cloritas: el clinocloro, la dumasita, la amesita, etc.

Clorofila: Las clorofilas son una familia de pigmentos que se encuentran en las cianobacterias y en todos aquellos organismos que contienen plastos en sus células, lo que incluye a las plantas y a los diversos grupos de protistas que son llamados algas. La función de las clorofilas es la absorción de energía luminosa en la variante de la fotosíntesis que llamamos fotosíntesis oxigénica, la que es característica de los organismos antes enumerados.

Clorofluorocarbonos (CFC): Productos químicos estables, no tóxicos y fáciles de convertir en líquido, utilizados en refrigeración, aire acondicionado, embalajes y aislantes o como disolventes y propelentes de aerosoles. Debido a que no se destruyen en la parte baja de la atmósfera ascienden hasta la capa de ozono y el cloro de sus componentes la destruye. Vida estimada 30-100 años. Reglamento 3322/88 sobre determinados CFC y halones que agotan la capa de ozono; recomendaciones 89/349, 90/437 y 90/438 sobre la reducción de los CFCs utilizados por la industria de aerosoles, y por la industria de espumas de plástico y por la industria de la refrigeración, respectivamente.

Cloroformo: $CHCl_3$. Líquido incoloro de peculiar olor etéreo. Importante anestésico, usos farmacéuticos, disolvente de grasas y aceites, resinas, caucho y otras numerosas sustancias. Se prepara industrialmente a partir del alcohol e hipoclorito cálcico. Se obtiene también de procesos biológicos en océanos y de la combustión del petróleo. Vida estimada 1-2 años. Mecanismo eliminación, reacciones fotoquímicas, destrucción capa de ozono. Está incluida entre las sustancias peligrosas que originan contaminación al ser vertidas en el medio acuático, directiva 74/464. Además la Directiva 86/280 y 88/347.

Cloromecato (CCC): Regulador del crecimiento usado para acortar y reforzar la paja en la avena y el trigo.

Cloroplastos: Células que permiten llevar a cabo la función fotosintética.

Clorosis: Síntesis deficiente de la clorofila que se manifiesta en el color amarillo de las hojas, causada principalmente por la falta de ciertos elementos nutritivos o por alguna otra sustancia.

Cloruro de metileno: es un líquido incoloro de leve aroma dulce. Se conoce también como diclorometano. No se encuentra de forma natural en el medio ambiente. El cloruro de metileno se usa como disolvente industrial y para remover pintura. También puede encontrarse en algunos aerosoles y pesticidas y se usa en la manufactura de cinta fotográfica.

Cloruro de metilo: CHCl. Se genera en la combustión lenta de materia orgánica: ambientes marinos (algas). Combustión de PVC y tabaco.

Cloruro de polivinilo (PVC): El más conocido y más usado de los plásticos de vinilo. Se usa en forma rígida (PVC rígido) para tuberías en las que es necesario una gran resistencia química. En forma plastificada se emplea para: láminas, cubiertas de cables, moldes y como fibra textil.

Cloruros: Sales del ácido clorhídrico obtenidas por la acción del ácido sobre metales. Muchos de éstos se combinan, también directamente con el cloro, para dar cloruros. Ión Cl- y sus sales (cloruros de sodio, potasio, etc.) o sales del ácido clorhídrico HCl, que en forma anhidra gaseosa se considera un cloruro, el cloruro de hidrógeno.

Club de Roma: Organismo no oficial creado en 1968 por el ingeniero Aurelio Peccei, se dedica, con el apoyo de toda una serie de fundaciones de diversos países, al estudio de los grandes problemas de la humanidad presentes y futuros. En 1972 publicó su primer informe: «Los límites del crecimiento», donde después de estudiar aspectos como población, producción industrial, alimentación,. Agotamiento de recursos y contaminación llega a la conclusión de que existen límites con respecto al crecimiento.

Clump: Estructura paisajística que consiste en plantar dos o tres árboles juntos de manera que sus copas se toquen.

CMA: (Concentraciones Máximas Autorizadas) Son límites de emisión definidos por ley para determinadas sustancias tóxicas, con el fin de proteger a quienes están expuestas a éstas.

CNAE: Es un código de Clasificación Nacional de Actividades Económicas que permite identificar y clasificar las diferentes sociedades según la actividad económica ejercida. Cada CNAE consiste en un Código de 5 dígitos, cada uno de los cuales representa un nivel más específico de actividad. Los dos primeros dígitos hacen referencia a la actividad genérica de cada empresa y los siguientes especifican dicha actividad.

CO: Véase *Monóxido de carbono.*

CO_2: Véase *Anhídrido carbónico* o *Dióxido de carbono.*

Coagulación: Proceso mediante el cual un sólido muy dividido que se encuentra en suspensión, o en dispersión coloidal, pasa a estar formado o por partículas de mayor tamaño de forma más o menos rápida. En los procesos de tratamiento de aguas residuales forma parte del tratamiento primario.

Coagulante: Sal inorgánica de metales polivalentes (generalmente hierro, aluminio o calcio) que se dosifica en las aguas residuales en procesos fisicoquímicos para conseguir desestabilizar el coloide y agregar partículas.

Coalescencia: Propiedad manifestada de ciertas sustancias de unirse o fundirse.

Cobertera: capa estable que se agrega en la etapa de sellado de vertederos.

Cocolitos: Ver *Foraminíferos.*

Co-digestión: La co-digestión es la mezcla de diferentes subproductos en el proceso de digestión anaeróbia, con el objetivo de conseguir una elevada producción de biogás y la valorización de residuos orgánicos.

Código LER: Lista Europea de Residuos (de la entrada en vigor de la Orden MAM/304/2002) que tiene como objetivo ayudar en la clasificación de residuos en función de su origen y naturaleza, sin la necesidad de realizar ensayos, al listar alrededor de unos 400 tipos de residuos señalados como peligrosos según la fuente que los haya originado.

Codisposición: Verter materiales de diferente naturaleza. Normalmente el término se refiere al vertido de residuos sólidos urbanos o industriales.

Coeficiente intregral (GLOBAL) de transmisión de calor (K): Es un coeficiente que depende de las capas que existen a un extremo y otro de una pared compuesta. Se expresa en kcal/ m^2h ℃. El factor más importante es el espesor de cada pared y el correspondiente valor del coeficiente de conductividad térmica de cada pared que lo compone así como de las capas límite. Su determinación es imprescindible para determinar las pérdidas de calor a través de las paredes.

Cogeneración: Producción combinada de electricidad (o de energía mecánica) y de energía calorífica a partir de una fuente de energía primaria, como el gas natural, gasoil o fueloil. Los sistemas de cogeneración más habituales son los que se basan en turbinas de vapor, ciclo combinado (turbina de gas y turbina de vapor) y motores alternativos de combustión interna.

Colas: tipo especial de pegamento blando, normalmente de color blanco.

Colector: Tubería que recoge y conduce las aguas procedentes de las alcantarillas.

Coliforme: Nombre aplicado genéricamente a todas las bacterias de la familia de las enterobacterias que son parásitos y saprófitos del intestino del hombre y de otros animales superiores.

Colmatación: Obstrucción de una capa de materia porosa o fibrosa o de un aparato a causa del depósito de partículas sólidas o líquidas.

Colofonia, resina de: Resina usada para formulación de adhesivos termofusibles.

Coloide: Partículas finas que confieren a las aguas residuales la turbidez característica.

Columna de intercambio iónico: Columna recubierta con un lecho de resinas de intercambio iónico.

Comburente: Sustancia que actúa como un agente oxidante en una combustión.

Combustión: Combinación de elementos químicos con oxígeno y desprendimiento de calor. La contaminación del aire por medio de gases de escape y temperaturas de los mismos se debe, en su mayor parte, a productos de combustión.

Common carrier: Fórmula que supone el acceso de un país miembro a la red de transporte de la energía petróleo, gas y electricidad en otro estado miembro, como derecho indiscutible en el interior de la Comunidad.

Compactación: Fase en la eliminación de productos residuales en vertedero consistente en aumentar su densidad. Tiene por objetivo reducir el espacio que necesitan las basuras y evitar el hueco entre ellas.

Complejo biológico: Sistema biológico en el que los productos residuales de cada nivel son usados como materias primas por el nivel siguiente, de forma que todo el sistema forma un ciclo.

Complexación: Proceso químico muy complejo donde los contaminantes quedas ligados de alguna forma para su transporte

Composite: Material formado por diversos componentes elementales como el amianto y cemento o poliéster y vidrio, cuya asociación confiere al conjunto propiedades que ninguno de dichos componentes poseen por separado.

Compost: Material tipo humus, bioquímicamente estable, constituido por materia orgánica, mineral y cerca de 40% de agua y pH neutro o poco alcalino. Resulta de la descomposición de la materia orgánica por procesos anaeróbicos o aeróbicos. También llamado mantillo. // Producto orgánico higienizado y parcialmente estabilizado.

Compostaje: Reciclado completo de la materia orgánica fermentable mediante el cual se la somete a fermentación controlada para obtener un producto estable de características definidas y útiles para la agricultura.

Compra Verde: Integración de la componente medioambiental en la toma de decisión de compra de bienes y contratación de servicios. Significa escoger los productos en función de su contenido, el envoltorio, las posibilidades de que sean reciclados, el residuo que generan, o si está en posesión de una ecoetiqueta.

Compuerta: Dispositivo o barrera móvil de seguridad y cierre de un flujo de agua, para obtener o regular la corriente del agua en un canal.

Compuestos inorgánicos: Compuestos químicos o combinaciones de los elementos de la tabla periódica excepto los compuestos del carbono.

Compuestos orgánico volátiles (COV): Cualquier compuesto orgánico que participa en las reacciones fotoquímicas de la atmósfera. Las principales fuentes de emisión son las industrias del petróleo y del gas natural, y los vehículos, tanto por efectos de la evaporación, como por combustión incompleta.

Compuestos organofosforados: Compuestos orgánicos que incluyen fósforo en su molécula. Son sustancias tóxicas con aplicaciones como plaguicidas.

Compuestos organohalógenos: Sustancias químicas orgánicas que contienen en su molécula uno o varios átomos de un elemento halógeno como el cloro. Entre ellos se encuentran sustancias pesticidas como el DDT (dicloro difeniltricloroetano), con toxicidad para los humanos y capacidad para circular por las redes tróficas y acumularse los organismos.

Compuestos químicos orgánicos: Sustancias producidas por plantas o animales que están formados por carbono, preferentemente, pero también por hidrógeno y oxígeno.

Concentrado: Producto de flotación obtenido en la minería donde se presenta el metal extraído del mineral.

Concesión: Permiso otorgado por la autoridad competente para la captación de agua subterránea.

Condensación: El proceso de formación de un líquido a partir de su vapor. Cuando el aire húmedo se enfría por debajo de su punto de rocío, el vapor de agua se condensa siempre que se hallen presentes superficies o núcleos de condensación. Estos núcleos pueden ser partículas de polvo o iones. La niebla, los cúmulos y las nubes se originan por condensación nuclear.

Conducción, transferencia de calor por: Transferencia de calor a través de un medio físico sin desplazamiento de materia.

Conducción: Es el método de transmisión de calor por excelencia sobre un soporte sólido. El calor se manifiesta como energía de rotación y vibración de las moléculas. Esta excitación se propaga molécula a molécula a través de la fase sólida.

Conductividad eléctrica: Parámetro que mide la facilidad de paso de una corriente eléctrica en un fluido.

Conductividad hidráulica: Velocidad de desplazamiento del agua a través de un suelo por unidad de gradiente o potencial hidráulico.

Conductividad térmica: Es la capacidad de los materiales para dejar pasar el calor. En otras palabras, es la capacidad de los elementos de transferir el movimiento cinético de sus moléculas a las adyacentes o a otros elementos cercanos.

Conferencia de Barcelona: 12 de febrero de 1976, para la protección del mar Mediterráneo contra la contaminación. Consta de un convenio marco con dos protocolos sobre cooperación para combatir, en situaciones de emergencia, la contaminación del mar mediterráneo causada por hidrocarburos y otras sustancias perjudiciales, y otro sobre control de vertidos voluntarios en el mar Mediterráneo. Forman parte del Convenio trece países ribereños del Mediterráneo.

Conferencia Intergubernamental de Estocolmo: Diciembre de 1972. Inicia los estudios ambientales en las administraciones públicas europeas.

Confinamiento: Acción de depositar un residuo, o un compuestos tóxico en un lugar que se cree más seguro.

Congénere: Compuestos químicos que responden a la misma fórmula pero que cambian la posición de algún elemento (ver isómeros).

Conglomerado: Roca sedimentaria, cuyos componentes son el cascajo redondeado y cemento calcáreo-arcilloso o arenoso. Aparece con un aspecto de muy diversos colores, con grano grueso; a menudo con tamaños de grano muy diversos. Tiene su origen, por compactación de cascajo o graba de ríos y mares, apareciendo en sedimentos marinos y agua dulce.

Conglomerante: Material ligante que une los granos de un conglomerado y que con su volumen contribuye a formar parte del compuesto.

Coníferas: Dícese de árboles y arbustos gimnospermos, de hojas perennes, aciculares o en forma de escamas, fruto de cono, y ramas que presentan un contorno cónico, como el ciprés, el pino y la sabina. Orden de plantas que producen piñas, en el que se incluyen casi todas las gimnospermas actuales. La mayor parte son árboles altos, perennes y hojas aciculares. Son característicos de las regiones templadas y forman los bosques principales de las zonas frías. Producen madera, resinas, tintes y trementina.

Cono de deyección: Acúmulo de materiales sedimentarios sueltos, transportados por un torrente y típicamente dispuestos en forma de cono o abanico al pie de una ladera.

Cono de Imhoff: Instrumento de forma cónica, en cuya parte inferior dispone de un papel de filtro, que se usa para determinar la fracción sedimentable del agua residual.

Consejo de Europa: Creado en 1949, está formado por 21 países miembros. En materia de medio ambiente ha llevado a cabo actividades relativas al agua (Carta Europea del Agua, Acuerdo sobre la restricción del uso determinados detergentes en productos de lavado y limpieza. Protección de Aguas superficiales contra la contaminación, etc.); relativas al aire (la «Declaración de Principios» sobre control de la contaminación atmosférica, Control de las emisiones de dióxido de azufre, la limitación de los contaminantes emitidos por los vehículos, etc.); actividades sobre ruido; actividades sobre aguas marinas; actividades sobre conservación de la naturaleza (gestión, vida silvestre, reservas naturales, información, educación y formación). El Comité de Ministros, formado por los Ministerios de Asuntos Exteriores de cada miembro, puede constituir Comisiones de carácter consultivo y técnico. Los Comités intergubernamentales están divididos en 11 Comités Directores, 88 Comités de Expertos y 5 Comités de Expertos «*ad hoc*».

Conservación: La gestión del uso, por parte de los seres humanos, de organismos o ecosistemas para garantizar el uso sostenible. Además del uso sostenible, la conservación también incluye protección, mantenimiento, rehabilitación, restablecimiento e incremento de las poblaciones y los ecosistemas.

Conservantes: Aditivos alimentarios, añadidos a los alimentos para prolongar sus condiciones higiénicas.

Consumidores: En un ecosistema dícese de los organismos heterotróficos, principalmente animales, que ingieren otros organismos o materia orgánica particulada.

Contaminación: Efecto de deterioro del medio ambiente como consecuencia de la actividad que desarrolla un agente. Se diferencian diversas clases de contaminación según la parte del entorno más afectada por la emisión de que se trate: gases nocivos y partículas en suspensión que deterioran el aire (contaminación atmosférica); residuos tóxicos en los ríos (fluvial) o mares (marítima), efluentes radioactivos (nuclear) desechos sólidos (industrial y/o municipal), ruido (acústica), etc. La contaminación puede tener caracteres acumulativos y alterar profundamente los ecosistemas.

Contaminación acústica: Perturbación sónica o radiación electromagnética al azar, que no es necesaria para el observador y que, incluso, puede entorpecer los sonidos importantes.

Contaminación atmosférica: Presencia de ciertas sustancias en concentraciones lo suficientemente elevadas, sobre el nivel ambiental normal, como para producir un perjuicio en la salud del hombre, animales, vegetación o a los materiales. Estas sustancias pueden ser de origen natural o antropogénico. Para la American Society for Testing Materials es «presencia en la atmósfera de sustancias no deseables, en concentraciones, tiempo y circunstancias tales, que pueden afectar significativamente al confort, salud y bienestar de las personas o al uso y disfrute de sus propiedades». Decisión 82/459 relativa al intercambio recíproco de informaciones y de datos procedentes de las redes y de las instalaciones aisladas que miden la contaminación atmosférica.

Contaminación de aguas: Contaminación de las aguas corrientes debido a una proporción cada vez mayor de aguas residuales procedentes de hogares, industrias, comercios y también por el lavado de materias sólidas. «La Carta del Agua» (1968) dice: «la polución consiste en una modificación, generalmente provocada por el hombre, de la calidad del agua, haciéndola impropia o peligrosa para el consumo humano, la industria, la agricultura, la pesca, las actividades recreativas así como para los animales domésticos y la vida natural». Directiva 76/464 relativa a la contaminación causada por determinadas sustancias peligrosas vertidas en el medio acuático de la Comunidad. Decisión 77/795 que establece un procedimiento común de intercambio de informaciones relativo a la calidad de las aguas continentales superficiales en la Comunidad. En España, las Confederaciones hidrográficas de las diferentes cuencas son los órganos de la Administración responsables del control de calidad de las aguas públicas.

Contaminación, derechos de: El gobierno determina el grado total de contaminación que puede tolerar el medio ambiente, y permite la existencia de un mercado libre donde se comercializan estos créditos. Se supone que con tal sistema, los mayores contaminadores han de comprar títulos de esta clase en el mercado, con lo cual su cotización se eleva, fomentándose de este modo la búsqueda de soluciones (uso de tecnología más limpia, etc.) para disminuir el nivel de contaminación.

Contaminante: Cualquier sustancia física, química, biológica o radiológica, que al introducirse en el medio ambiente causa efectos adversos a la utilización de un recurso natural.

Contaminantes de aire peligrosos: Contaminantes de aire que no están cubiertos por los estándares de calidad del aire, pero que representan una amenaza para la salud humana o para el medio ambiente. La lista incluye 1.890 productos químicos según criterios de la EPA.

Contaminantes primarios: Proceden directamente de fuentes de emisión, son evacuados directamente al medio (por ejemplo, la atmósfera) por fuentes puntuales (chimeneas, conductos) o bien por fuentes lineales (automóviles). Las más importantes a nivel cuantitativo son: SO_2, NOx, CH_4, HCl, partículas, etc. Si son de origen natural (productos resultado de incendios forestales, ozono de origen fotoquímico, etc.), se consideran contaminante ambiental cuando se encuentran en exceso.

Contaminantes secundarios: Son aquellos originados por interacción química entre los contaminantes primarios y los componentes normales del medio. en la atmósfera: SO_3, O_3, NO_2, etc.

Contenedor de recogida selectiva: Contenedor destinado a recibir exclusivamente o separadamente una única fracción de residuos municipales, como el vidrio, papel, plástico, materia orgánica, pilas, envases o ropa.

Contenido de agua del suelo: Cantidad de agua retenida por un suelo durante su secado hasta un peso constante a 105 ℃, expresado en gramos de agua por gramo de suelo seco o en cm^3 de masa de suelo.

Control de olores: Conjunto de procedimientos que tienen por objeto la prevención o el tratamiento de los olores desagradables.

Control integrado: Conjunto de métodos que tienen por objeto combatir las plagas y enfermedades de los cultivos, basados en la racionalización de los tratamientos fitosanitarios, la potenciación del control biológico y la gestión cuidadosa de los mismos cultivos.

Convección: A diferencia de los sólidos, en los fluidos las moléculas no están fuertemente unidas entre sí. La excitación se traduce en un incremento de la cantidad de movimiento de las mismas.

Convección, transferencia de calor: Transferencia de calor que se da en los fluidos que va acompañada de desplazamiento de materia. Esta puede ser natural o forzada mediante un sistema mecánico.

Convenio de Basilea: Relativo al tránsito transfronterizo de residuos en la Comunidad, pretende asegurar un mayor control de estos residuos en el país destinatario, asegurándose de que este país disponga de instalaciones adecuadas para su gestión. También la Directiva 87/112 y la Resolución 89/9 persiguen establecer este sistema de seguimiento y control de los traslados transfronterizos de residuos peligrosos.

Convenio de Estocolmo: es el instrumento internacional que regula el tratamiento de las sustancias tóxicas, auspiciado por el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). Este convenio ha sido el resultado de largos años de negociación para obtener compromisos legales de los países que obligue de manera urgente la eliminación de todos los Compuestos Orgánicos Persistentes (COPs). El Convenio determina a una docena de compuestos sobre los que es preciso emprender acciones de forma prioritaria, es la conocida como «docena sucia», que incluye productos químicos, tales como: pesticidas, PCBs; dioxinas y furanos.

Convenio de Ginebra: 29 de abril de 1958. Plataforma continental, pesca y conservación de los recursos vivos de alta mar. Persigue resolver mediante la cooperación internacional los problemas que entraña la conservación de los recursos vivos en alta mar, considerando que, a raíz del desarrollo de las técnicas moderas, existe el peligro de que algunos de esos recursos sufran explotación excesiva. Codificación de normas de derecho internacional respecto a alta mar.

Convenio de Ginebra de 1979: Se firman acuerdos a cumplir a partir de 1983, de esfuerzo para limitar y, dentro de lo posible, reducir gradualmente y prevenir la contaminación atmosférica transfronterizas a larga distancia, con especial hincapié en el SO_2, considerado ya el causante de la acidifacación. Se ha ratificado por 30 países y por la UE.

Convenio de Londres: 12 de Mayo de 1954, entró en vigor en 1958. Convenio internacional para prevenir la contaminación del mar por hidrocarburos. Este Convenio, primero a escala mundial, regula la descarga al mar de hidrocarburos, por los buques. Define hidrocarburos como «petróleo crudo, fueloil, diesel, aceite pesado o aceites lubricantes».

Convenio de Oslo: 15/2/1972. Para la prevención de la contaminación marina por vertidos de buques y aeronaves, referido al Atlántico Nordeste y Mar del Norte. Iniciaron el sistema de la doble lista gris o lista II ~~con~~ autorización estatal~~.~~ Acuerdos a destacar en este Convenio: sobre vertidos en el mar de la industria del dióxido de titanio, la finalización de la incineración en alta mar de residuos tóxicos en la zona del Convenio, radioactividad. Ha sido firmado por 13 países europeos

ribereños del Atlántico Norte, entre los que se encuentra España.

Convenio de París: 18 de octubre de 1950. Convenio internacional para la protección de las aves. El objetivo es proteger las aves en estado silvestre, considerando que en el interés de la ciencia, la protección de la naturaleza y la economía de cada uno de los países, todas las aves deberán, por ejemplo, ser protagonistas.

Convenio de París de 1974: 4 de junio de 1974. Para la prevención de la contaminación marina de fuentes telúricas y referido a los vertidos terrestres en los mares europeos, aplicable a los vertidos en el mar o a través de ríos en el Mar del Norte y Atlántico Nordeste. Incluye el sistema de doble lista de sustancias peligrosas. Las nuevas aportaciones se refieren a los vertidos de mercurio y cadmio (1985) y las descargas atmosféricas (1987).

Convenio de Viena: 1985. Relativo a la emisión de CFC's a la atmósfera. Pretende reducir ésta en, al menos, un 30%, y enfrenta las posturas de los que pedían una prohibición total de los usos no esenciales grupo de Toronto ~~y l~~os partidarios de reducciones parciales en la producción total ~~C~~omunidad.

Convertidor: Equipo donde se lleva a cabo el proceso de convertir una forma de energía en otra, esto puede incluir procesos electromecánicos o electroquímicos.

Convertidor catalítico: Dispositivo que contiene uno o diversos catalizadores, utilizado para reducir la contaminación. Se utiliza como medida correctora contra la emisión de contaminantes atmosféricos de los automóviles o de algunas industrias.

COP'S: (Contaminantres Orgánicos Persistentes),

Coque: Residuo sólido resultante de un carbón después de que la materia volátil de éstos ha sido eliminada por la destilación. El coque se usa como combustible, y en metalurgia como agente reductor de óxidos metálicos. La directiva 84/360 relativa a la lucha contra la contaminación atmosférica procedente de las instalaciones industriales, exige una autorización previa al establecimiento de industrias en energía, entre estas las coquerías.

Coque de petróleo: es un producto residual de elevado contenido en carbono, resultante de la pirólisis de las fracciones pesadas obtenidas en el refino del petróleo, que ha pasado a través de un estado líquido (también denominado mesofase) durante el proceso de carbonización y que está constituido por carbono no grafítico pero grafitizable.

Coral: Animales marinos con esqueleto calcáreo.

Corcho: Súber o tejido suberoso que producen los tallos de las plantas con crecimiento secundario en su capa externa, formado por las paredes celulares suberificadas de células muertas y llenas de aire. El alcornoque, *Quercus suber*, produce gruesas capas de corcho que tiene diversas aplicaciones. El descorche de los alcornoques para explotar el corcho se realiza cada ocho o nueve años.

Corcho suple: Corcho esponjoso que recupera con facilidad la forma original después de haberlo comprimido.

Corindón: Óxido de alúmina. Mineral extremadamente duro que se emplea, entre otras aplicaciones, para la fabricación de abrasivos.

CORINE (Coordination of Information on the Environment) Land Cover: Proyecto que desarrolla la creación de una base de datos sobre la cobertura y uso del territorio en la Unión Europea. Es dirigido por la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA). Tiene como objetivo fundamental la captura de datos de tipo numérico y geográfico para la creación de una base de datos europea a escala 1:100.000 sobre la cobertura y uso del territorio mediante la interpretación a través de imágenes recogidas por la serie de satélites LandSat y SPOT. Aunque se fundamenta en este tipo de imágenes de teledetección como fuente de datos es, en realidad, un proyecto de fotointerpretación y no de clasificación automatizada. Su principal fin es facilitar la toma de decisiones en materia de política territorial dentro de la Unión Europea.

Coriolis, fuerzas de: Aceleración a la que están sometidos todos los cuerpos de la Tierra debido a la aceleración (de Coriolis) que provoca el cambio de velocidad de rotación según la latitud. Ello afecta mucho a la meteorología.

Corrientes de Eddy, o de Enders: Separación de conductores a partir de materiales no-conductores por medio de campo eléctrico. Está basada en los principios de la inducción electromagnética (Ley de Farday)y es utilizada para identificar o diferenciar entre una amplia variedad de condiciones físicas, estructurales y metalúrgicas en partes metálicas ferromagnéticas y no ferromagnéticas, y en partes no metálicas que sean eléctricamente conductoras. Son creadas usando la inducción electromagnética, este método no requiere contacto eléctrico directo con la parte que está siendo inspeccionada.

Corrientes de Fourault: Llamadas también corrientes parásitas.

Corrosivo: Agente químico que reacciona con la superficie de un material provocando su deterioro o desgaste.

«Corta, La»: Nombre que se le da a la forma geométrica que puede presentar una mina de rajo abierto.

Cortafuegos: Barrera natural o artificial para separar, detener y controlar la propagación del fuego, o para tener la línea de contención desde la que poder trabajar.

Cosméticos: Dicho de un producto que se utiliza para la higiene o belleza del cuerpo, especialmente del rostro.

Cosolvatación: Introducción en el subsuelo de cantidades de disolventes orgánicos con la finalidad de cambiar el comportamiento y destino habitual del agua.

COT: Véase *Carbono orgánico total*.

COV: Véase *Compuestos orgánicos volátiles.*

CPC: Cenizas de Paja de Caña. También (energía solar) Concentrador Parabólico Compuesto.

Cracking: (Craqueo) Proceso de transformación de determinadas fracciones del petróleo en otras más ligeras por el efecto combinado de la temperatura, la presión y, a veces, un catalizador.

Craqueo: Procedimiento utilizado en la industria petroquímica donde ocurre el desdoblamiento de moléculas pesadas en moléculas más ligeras por la acción del calor.

Crecimiento vegetativo: Diferencia entre las tasas de natalidad y mortalidad.

Creosota: Aceite de creosota. Procede de la fracción de aceites pesados de la destilación del alquitrán. Contiene además fenol y cresoles. Se usa para impermeabilizar la madera.

Cresoles: Compuestos químicos que se encuentran en el alquitrán de hulla y de madera. Son tóxicos y tienen la misma aplicación que los fenoles.

Creta: Variedad de caliza porosa de grano fino, formada por caparazones de foraminíferos.

Criba: Máquina utilizada en minería o también en pretratamiento de residuos para llevar a cabo una separación según diámetros, espesores o densidades.

Criba rotativa: Véase *Trómel*.

Cribado: Pretratamiento de un sólido o líquido a través de tamices o dispositivos que contengan telas de diferente luz de paso. // Pretratamiento de las aguas residuales que consiste en eliminar los sólidos mediante rejas y tamices.

Criolita: Mineral incoloro perteneciente al grupo de los fluoruros. (Na_3AlF_6, fluoruro de aluminio y sodio). Su importancia proviene de su facilidad de disolver el óxido de aluminio (Al_2O_3); por esta razón se emplea como fundente de la alúmina en la obtención del aluminio por electrólisis.

Crioturbados: Suelos sometidos a la crioturbación, es un fenómeno que ocurre en latitudes elevadas y áreas periglaciares donde el suelo está sometido hasta cierta profundidad a la secuencia estacional de helada y deshielo que produce desplazamientos de partículas modificando su distribución en las capas del suelo.

Criptocristalinos: Carácterística en los minerales que se caracterizan por una concentración de materiales orgánicos o inorgánicos que son prácticamente isótropos al microscopio de polarización.

Criptogamas: Grupo taxonómico constituido por las plantas desprovistas de flores. Algas, helechos, hongos, musgos.

Crisotilo: Mineral del que procede el asbesto. Es una fibra mineral que no se quema ni se pudre, resiste a la mayoría de los productos químicos, es flexible y tiene una gran resistencia a la tracción.

Cristobalita: Silicatos cuya fórmula química es SiO_2. Estas partículas microscópicas tienen un diámetro de aproximadamente 0,1 µm (1/10.000 de milímetro) y se encuentran como estructuras empaquetadas en un enrejado tridimensional.

Criteria, contaminantes: Seis contaminantes del aire conocidos como peligrosos para la salud humana; ozono, monóxido de carbono, partículas en suspensión, dióxido de azufre, plomo y óxidos de nitrógeno. Criterio de la US EPA.

Criterios de ruido: Series de curvas que relacionan los niveles sonoros en octavas con la interferencia de una conversación y su aceptación en aplicaciones particulares, como son los trabajos en el ambiente, que puede verse perjudicado por contaminación sonora.

Crocidolita: Conocido como el asbesto azul. Es muy peligroso y pertenece a la variedad anfíbol, que se obtiene únicamente en Africa. Sus fibras son realmente mortíferas: su pequeñez hace que penetren en los alvéolos pulmonares y, una vez allí, son casi imposibles de eliminar. Variedad mas nociva del asbesto.

Cromatóforos: o cloroplasto. Pigmento de las algas.

Cromatografía: Método analítico utilizado para separar mezclas difícilmente separables por otros procedimientos. Se distingue cromatografía de análisis de adsorción, de partición, en papel, en capa fina, de gases y electroforesis en papel.

Cronómetro: Instrumento para medir el tiempo.

Crustáceos: Artrópodos de respiración branquial con dos pares de antenas, ojos compuestos, típicamente con apéndices birrámeos y metamorfosis. La mayoría son acuáticos de agua dulce y marinos, pero existen formas terrestres. Muchas especies pequeñas y formas larvarias son un componente importante del zooplancton. Otras especies de mayor tamaño tienen importancia comercial.

CSF: (Condensed Silica Fume). Gas de silica condensado es un subproducto obtenido en el proceso productivo de las ferroaleaciones. Su fórmula química es SiO_2.

Cuarto estado de la materia: Estado en que se encuentran los gases cuando se hallan a elevada temperatura (miles de grados), existe una segregación de los electrones de los núcleos atómicos. Abreviadamente se denomina plasma.

Cuarto mundo: Mundo emergente basado en pequeñas naciones, en comunidades de autosuficiencia y vida a escala humana.

Cuarzo: El cuarzo es el mineral más abundante de la naturaleza. Su fórmula es SiO_2. Sin exfoliación, cristaliza en el sistema trigonal (romboédrico) y es incoloro en estado puro, aunque puede adoptar numerosas tonalidades si lleva impurezas. De gran dureza, es capaz de rayar el acero.

Cuarzoide: Nombre que se da a los cristales de cuarzo deformados.

Cubierta: Material o materiales transparentes que recubren la abertura del colector y que, expuestos a la ra-

diación solar, captan la radiación infrarroja del absorbedor por el efecto invernadero.

Cuenca endorreica: Región interior cuya red hidrográfica no desagua al mar. Topográficamente son depresiones, y pueden estar rodeadas de terrenos montañosos.

Cuerpo negro: Material que absorbe toda la radiación que le llega.

Cultivo energético: Tipo de cultivo cuyo fin es exclusivamente el aprovechamiento energético, bien directamente o mediante procesos de conversión energética.

Cultivo orgánico o biológico: Cultivo agrícola sin el uso de fertilizantes o pesticidas, de acuerdo con los principios definidos por Sir Albert Howard, Lady Eve Balfour y otros.

Cultivos acolchados: Técnica de cultivo por la que ciertas especies de porte herbáceo, en una etapa inicial de desarrollo, se protegen mediante una película de plástico que después se horada.

Cultivos forrajeros: Cultivos de plantas que se usan para alimentar al ganado como la alfalfa y el maíz forrajero.

Cultivos herbáceos: Constituidos por plantas cuya parte aérea tiene consistencia herbácea.

Cultivos hidropónicos: Cultivos de plantas en agua o arena, esto es, carentes de suelo como sustrato, a los que se aportan los nutrientes mediante soluciones químicas preparadas al efecto. Frecuentemente se precisan soportes de apoyo o guías.

Cultivos leñosos: Constituidos por plantas cuya parte aérea tiene consistencia leñosa. Se excluyen los árboles forestales y sus viveros.

Cumbre de Dublín: Celebrada en junio de 1990. Los jefes de Estado de Gobierno de la Comunidad optaron por el desarrollo sostenible y encargaron a la Comisión de Desarrollo Sostenible la elaboración del *Quinto Programa de Medio Ambiente.*

Cumbre de Río: Véase *Río, Cumbre de*.

Cumbre del Clima (Milán): Encuentro realizado en diciembre del año 2003 donde se reunieron 180 representantes de distintos países en virtud de la *Novena Conferencia de las Partes de Naciones Unidas* con el objeto de revisar los avances en materia de reducción de gases efecto invernadero. Concluyó con un protocolo jurídicamente no vinculante según el cual las emisiones de gases efecto invernadero deberán reducirse, entre 2008 y el 2010, en una media de un 5,2% respecto a los niveles de 1990 y 1995.

Cúmulo: Nube baja de contorno bien delimitado, que se desarrolla verticalmente en forma de protuberancias, compuesto por gotitas de agua en la parte más baja y por cristales de hielo en la parte alta.

Curie: La unidad de medición cuantitativa de radioactividad, equivalente a $3{,}7 \times 10^{(10)}$ desintegraciones/segundo.

Curio: Unidad de actividad de una sustancia radioactiva igual a 37.000 millones de becquereles.

Curva de potencia: Representación gráfica de la potencia suministrada por un aerogenerador en función de la velocidad del viento incidente.

Curvas de nivel: Son isolíneas de altura o líneas que unen puntos de igual altitud. Resultan de cortar el relieve por planos paralelos al plano horizontal y separados entre sí por una distancia constante. La proyección de las líneas de corte sobre un plano a escala permite obtener el mapa de curvas de nivel, que es una representación clásica del relieve.

Czochralski, proceso de: Proceso de recristalización para la obtención de lingotes monocristalinos de silicio de donde, por corte, se obtienen las obleas para los paneles fotovoltaicos.

Dalapon: Herbicida usado para eliminar hierbas y para evitar las pérdidas de agua debido al entorpecimiento causado por el crecimiento de plantas monocotiledóneas y cañas.

Dalton, ley de: Expone la proporcionalidad entre las fracciones molares de los diversos componentes de un gas y sus presiones parciales, cuya suma constituye la presión total del gas.

DAOM (Manual de Diagnosis Ambiental de Oportunidades de Minimización): Es una herramienta desarrollada por el CEMA donde técnicos expertos evalúan una actividad industrial o un proceso para determinar las posibles oportunidades de prevención y reducción en origen de la contaminación, así como aportar alternativas de actuación técnica y económica viables.

Darcy, ley de: Mide la impermeabilidad de los terrenos, aspecto fundamental en los vertederos.

Datación radiocarbónica: El carbono, presente en todos los organismos, tiene un isótopo radioactivo, el carbono 14, con un periodo de semidesintegración de 5.600 años, lo que permite efectuar un cálculo (datación) de la antigüedad de la muestra.

dB: (Decibelio). Unidad relativa en una escala logarítmica equivalente a la décima parte de un bel.

dB (A) (Decibelio A): Unidad de medida de la intensidad del sonido, de la potencia acústica o de la presión sonora.

DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno): Indicador biológico. Mide la cantidad de oxígeno necesaria para la reacción (higienización) aerobia de una muestra de agua residual, medida por la decoloración que se produce en una solución de permanganato potásico. Cantidad de oxígeno requerido por las bacterias para convertir en compuestos estables los materiales orgánicos. A mayor demanda de oxígeno, mayor es el grado de contaminación. // Ensayo normalizado para evaluar el consumo de oxígeno por vía biológica de la materia orgánica contenida en una muestra de aguas residuales a 20 ℃ en la oscuridad y durante 5 días.

DDE: Producto del metabolismo del DDT, que tiene el mismo efecto.

DDT: Dicloro-difenil-tricloroetano. Insecticida clorado sintético, notable por su alta toxicidad para los insectos, aún a pequeñas proporciones de aplicación. Actúa como insecticida por ingestión o por contacto, teniendo la ventaja de la persistencia a su actividad, en comparación con los insecticidas naturales antiguos. Junto con otros cloruros orgánicos, ha tenido un efecto destructivo sobre especies superiores en sus cadenas alimentarias, en particular aves de presa y especialmente venenoso para los peces. Debido a sus efectos secundarios, su uso está limitado en varios países, como en el caso de Estados Unidos, donde la US EPA lo prohibió en 1972 debido a su permanencia en el medio ambiente (tiene una vida media de 15 años), y su acumulación en la cadena de alimentación. Se le conoce también como dicofán o clofenotona. A nivel comunitario las Directivas 86/280, 88/347, 90/415 se refieren a los valores límite y objetivos de calidad para los residuos de determinadas sustancias peligrosas ~~la~~ concentración de DDT total en las aguas continentales superficiales no ha de ser superior a 25 ug/l, a partir de 1.1.88. ~~E~~l Reglamento 1734/88 establece un procedimiento común de notificación y de información centralizado a nivel comunitario para las exportaciones de 23 productos químicos prohibidos o estrictamente reglamentados, entre ellos el DDT. En España la primera reglamentación es la Orden de 22 de marzo de 1971 prohibiendo el DDT salvo para el olivo y la vid. Y también una Orden del Ministerio de Agricultura de 4.12.85, restringe el uso de plaguicidas entre ellos el DDT.

De la cuna a la tumba: *(Cradel to grave)*. Para que un producto sea definido como ecológico debe serlo en la totalidad de su vida, desde su concepción (cuna) hasta su eliminación como residuo (tumba).

Debaste: Producción de un concentrado impuro como paso previo en el tratamiento de un mineral, reduciendo así el tamaño para un tratamiento posterior.

Decantación: Efecto de verter el líquido de una suspensión que ha sedimentado. // Procedimiento para separar fracciones de partículas finamente divididas de acuerdo con su velocidad de sedimentación en relación a un flujo ascendente de fluido.

Decantación primaria: Proceso inicial de decantación a que se someten las aguas residuales para separar las materias en suspensión.

Decantación secundaria: Decantación que se realiza para separar el agua depurada de los fangos biológicos.

Decantador: Recinto en donde se dejan reposar las aguas residuales durante el tiempo necesario para que decanten los sólidos en suspensión por la acción de la gravedad.

Decapado: Operación de romper la cubierta muerta forestal y parte superior del suelo como medida preparatoria. // Limpieza de la superficie de metales de herrumbre.

Decibelio: (dB). Unidad usada para medir la intensidad del sonido, en una escala logarítmica basada en mediciones de intensidad sonora en watios por metro cuadrado y relacionada con una de referencia, 10^{-2} w/m^2, que es la intensidad del sonido más baja que percibe el oído humano. El decibelio es la décima parte del bel (1 bel = 10 dB).

Declaración de carga contaminante vertida: Declaración que está obligado a presentar todo usuario industrial de agua, sujetos pasivos del incremento de tarifa de saneamiento o del canon de saneamiento, delante de la Autoridad Ambiental referente al volumen y a la cantidad del vertido de aguas residuales, la cual tiene que contener los datos necesarios para la determinación del tributo.

Declaración de Impacto Ambiental: Informe fundamentado en estudios detallados que describe las consecuencias sobre el medio ambiente de una acción a llevar a cabo, un proyecto industrial, etc.

Decloración: Proceso para reducir la carga halogenada de un compuesto.

Deconstrucción: véase *deconstruir*.

Deconstruir: deshacer analíticamente los elementos que constituyen una estructura arquitectura.

Deflector: Dispositivo sumergido en el agua parcialmente o total, que tiene por misión modificar el flujo normal del agua.

Defloculantes: Materiales solubles que se adicionan a suspensiones acuosas para aumentar la fluidez.

Defoliación: Efecto biológico sobre la vegetación que consiste en la caída prematura de las hojas de los árboles y plantas, producida por enfermedad o influjo atmosférico.

Defoliante: Herbicida diseñado para eliminar las hojas de los árboles y arbustos o para matar a los vegetales. Los defoliantes distorsionan los equilibrios hormonales de las plantas, causando desórdenes metabólicos.

Deforestación: Eliminación permanente del bosque y de la vegetación acompañante sin que sea reemplazada.

Degradación: Proceso mediante el cual un producto químico se reduce a una estructura más simple. La materia se descompone en sus constituyentes básicos como el agua y el CO_2 a través de procesos naturales. El término se aplica a aquellos productos especialmente tratados para conseguir una rápida descomposición, ya que el tiempo puede hacer degradable cualquier compuesto.

Degradadores: En un sistema, organismos heterotróficos, principalmente bacterias y hongos, que descomponen los compuestos complejos del protoplasma muerto, absorbiendo algunos de los productos de la descomposición, pero desprendiendo también sustancias simples utilizadas por los productores.

Dehesa: Tierra generalmente acotada y por lo común destinada a pastos. Agroecosistema.

Dehiscencia: Apertura espontánea de un fruto que permite la salida de las semillas.

Delito ecológico: Según el artículo 347 bis del Código Penal, se define delito ecológico como aquellas actuaciones que en contradicción con las leyes o reglamentos protectores del medio ambiente provoquen o realicen directa o indirectamente emisiones o vertidos de cualquier clase de atmósfera, suelo o aguas terrestres y marítimas que pongan en peligro la salud de las personas o puedan perjudicar gravemente las condiciones de vida animal, bosques, espacios naturales o plantaciones útiles. También se consideran delito ecológico las actuaciones que puedan originar un riesgo de deterioro irreversible o catastrófico.

Delta: Acumulación de sedimento en la desembocadura de un río. Se dan las condiciones para la formación de un delta cuando la deposición de sedimentos en el mar o en un lago es mayor que su eliminación. Los deltas son típicamente triangulares, con el vértice hacia la corriente.

Demanda Bioquímica de Oxígeno: Véase *DBO*.

Demanda de oxígeno sedimentado (DOS): Demanda de oxígeno que ejerce un residuo carbonoso cuando se biodegrada.

Dendrografo: Instrumento que sirve para medir los periódicos movimientos de hinchazón y encogimiento de los troncos de los árboles.

Densidad base de subsistencia: Densidad límite a partir de la cual la supervivencia de la población humana es imposible.

Densidad energética: Energía de un compuesto por unidad de volumen.

Densímetro: Aparato empleado para la determinación de la densidad. En el caso de los fangos de EDAR la precisión debe ser del orden de 10^{-4}, es decir la diezmilésima.

Deposición controlada: Vertido realizado según unos procedimientos técnicos y una reglamentación y normativa determinados.

Depósito: (Ver también *Vertedero*). Se entiende uno o más componentes del sistema climático en que está almacenado un gas de efecto invernadero o un precursor de un gas de efecto invernadero. // (Geol.) Contenedor subterráneo natural con fluidos como agua, petróleo o gas natural. // Lago artificial o natural para el almacenamiento de agua para la industria o el hogar y para la regulación de los niveles de agua en tierra; cubren las fluctuaciones de la demanda y estaciones.

Depósitos abisales: Los depósitos del fondo del mar, acumulados en profundidades de más de 3.000 metros. Comprenden los limos orgánicos, lodos varios y la arcilla roja de las regiones más profundas.

Depósitos deltaicos: Acumulaciones de arena y arcilla con organismos de aguas salobres, residuos vegetales acarreados y restos de animales arrastrados desde tierra.

Depósitos ferruginosos: Rocas sedimentarias que contienen suficiente hierro para justificar su explotación como mineral.

Depósitos fluviales: Conjunto de arena, areniscas y limos, depositados en los lechos de los ríos.

Depuración: Acción de limpiar una sustancia de las que está mezclado con ella y le es perjudicial. Los métodos pueden ser de naturaleza muy distinta como por ejemplo la precipitación, intercambio de iones, carbón activo, ósmosis, etc.

Depuración aerobia: Depuración de aguas residuales mediante la actividad de microorganismos que sólo pueden vivir con la presencia de oxígeno.

Depuración anaerobia: Depuración de aguas residuales mediante la actividad de microorganismos capaces de vivir en ausencia de oxígeno.

Depuración biológica: Asimilación de la materia orgánica biodegradable presente en las aguas residuales a partir de reacciones de oxidorreducción por parte de microorganismos.

Depuración de aguas residuales: Tratamiento de las aguas residuales con la finalidad de separar los elementos perjudiciales y transformarlos de manera que sean aceptables para un uso posterior.

Deriva litoral: Por la acción del viento, las masas de agua marina inciden sobre la línea de costa bajo un cierto ángulo, lo que produce dos efectos: 1) el exceso de agua se elimina lateralmente, por una corriente de agua paralela a la línea de costa, o deriva litoral, y 2) los sedimentos son aportados en la misma dirección del oleaje que incide sobre la costa, pero al retirarse el agua tienden a alejarse perpendicularmente. Esta acción repetida tiene el efecto de producir un desplazamiento del sedimento paralelo a la línea de costa, llamado deriva de playa.

Derrame: Acción de salir o sacar una sustancia líquida o disgregada por el recipiente que la contiene.

Derrik: Tipo de grúa que se emplea para la perforación de pozos petrolíferos.

Desalación: Véase *Desalinización*.

Desaladora: Instalación donde se desarrolla el proceso de desalinización del agua salobre ó salada con el objeto de obtener agua dulce.

Desalinización: Extracción de sales de agua de mar o aguas salobres para obtener agua dulce útil para el consumo; la técnica más empleada es la de membranas.

Desamiantado: Proceso mediante el cual se realiza la descontaminación, retirada y eliminación del amianto (asbesto) de una superficie o material determinado.

Desarenado: Pretratamiento de agua en el proceso de depuración, cuyo objeto es separar la arena y la grava de

los materiales más ligeros y floculantes. La arena se separa por sedimentación reduciendo la velocidad de circulación, hasta 0,3 m/s aproximadamente para precipitar las partículas de diámetro superior a 0,2 mm antes de que las aguas pasen a las bombas y a los sedimentadores, pues dificultan la sedimentación de los lodos.

Desarenador: Recinto donde por la acción de la gravedad se consigue la sedimentación de sólidos presentes, especialmente arena.

Desarrollo sostenible: Política y estrategia de desarrollo económico y social continuo que no vaya en detrimento del medio ambiente ni de los recursos naturales de cuya calidad dependen la continuidad de la actividad y el desarrollo de los seres humanos.

Desbaste: Operación que se realiza a la entrada de las aguas residuales en la EDAR para prevenir el ingreso de objetos de gran tamaño. Se subdivide entre desbaste fino (3 a 10 mm), medio (10 a 25 mm) y grosero (50 a 100 mm).

Desbroce: Cortar y arrojar fuera las matas y vegetación leñosa ligera.

Descarbonatación: Proceso de destrucción de los carbonatos.

Descarnado: Etapa del proceso de curtiembre donde se destruye el pelo, y a mano o a máquina se eliminan los restos de epidermis (carne y grasa) que deben ser eliminadas para evitar (entre otras consecuencias) el desarrollo de bacterias sobre la piel .

Descomposición: Proceso de eliminación de materia mediante bacterias y hongos. Cambio de la composición química y la apariencia física de los materiales mediante la separación de la materia orgánica en componentes más simples.

Descrude: Etapa de curtido que sirve para eliminar los aceites, ceras y otras impurezas. Esto se logra generalmente mediante la emulsificación de los aceites sintéticos y ceras o mediante la saponificación de las impurezas de origen natural (triglicéridos).

Desde la cuna a la tumba (*From cradle to grave*): término utilizado para denominar al seguimiento de un material u objeto determinado desde que se genera hasta que se entrega como residuo.

Desechable: Algo diseñado para un solo uso que, después de emplearlo, se tira.

Desechería: También conocida como Punto Limpio**.** Instalación de recepción y almacén selectivo de residuos domésticos que no son objeto de recogida domiciliaria.

Desecho: Cualquier sustancia sólida, líquida o gaseosa, que no puede usarse como un organismo o por cualquier sistema que lo produce, debiéndose diseñar métodos para su eliminación.

Desencalado: Operación que sirve para eliminación de la cal (unida químicamente, absorbida en los capilares, almacenada mecánicamente) contenida en el baño de pelambre y para el deshinchamiento de las pieles.

Desengrasador: Equipo estático o dinámico destinado a eliminar de las aguas residuales, por flotación, todo tipo de sólidos poco densos o sustancias inmiscibles en el agua y menos densas, especialmente aceites y grasas.

Desertificación: Término que hace referencia al proceso por el cual un área geográfica determinada pierde gradualmente su cubierta vegetal, degradación progresiva de los suelos que hace que éstos adquieran condiciones de tipo desértico. Influyen en este proceso la sequía y la acción del hombre ~~por~~ deforestación anárquica, roturaciones inadecuadas, mal uso del suelo con regadíos sin estudiar que favorecen la salinización de la tierra y la utilización reiterada de fertilizantes y herbicidas, pastoreo intensivo, etc.~~ h~~asta el punto de que las posibilidades agrícolas desaparecen y las ganaderas se reducen al mínimo. Aparte de las causas naturales (cambios climáticos inducidos por fenómenos muy complejos), la desertificación tiene su origen principal en el irracional aprovechamiento de los recursos naturales. Su estudio se lleva a cabo a través de un método científico ~~car~~tografía vegetal ~~q~~ue permite su observación y coordinación. La Agenda 21 destina un capítulo a la lucha contra la desertificación, que afecta a los sistemas de vida de una sexta parte de la población mundial y a una parte del total de la superficie de tierra del planeta. **P**roceso natural bioclimático que tiende a convertir en árida y desértica una región que antes no lo era.

Desestabilización: Pérdida de repulsión entre las partículas coloidales de las aguas residuales que se consigue añadiendo un reactivo químico (sales minerales) con carga eléctrica opuesta que neutraliza la carga eléctrica de las partículas.

Desferrización: Operación de eliminación del contenido de hierro en las aguas.

Desgasificación: Fenómeno de salida de gases producto de reacciones anaerobias (a veces aerobias) que tienen lugar en los vertederos. También se llama así a los gases y vapores que se despenden de un sólido o líquido cuando se calientan.

Desgrasante: Material que posee la propiedad de facilitar la salida del agua de una masa arcillosa. Por lo habitual se trata de áridos.

Desguace: Desmontaje de un vehículo, de un aparato, etc. para aprovechar lo que pueda ser útil.

Deshidratación de fangos: Proceso mecánico para separar una parte importante del agua contenida en los fangos producidos en una estación depuradora de aguas residuales.

Desinfección: Proceso de potabilización en el tratamiento del agua. En general deben eliminarse todos los microorganismos patógenos que contiene el agua. La desinfección de las aguas puede efectuarse por métodos físicos (calor, luz) o químicos (productos oxidantes, iones, metálicos, álcalis, ácidos, productos químicos

tensoactivos, permanganato potásico, ozono, cloro, yodo, etc.). La desinfección no es esterilización, la cual implica la destrucción de todos los seres vivientes que existen en el agua.

Desintegración: Transformación nuclear donde se emiten partículas radioactivas.

Deslanado: Etapa del proceso de la industria curtiembre que consiste en un tratamiento químico o enzimático con el objeto de destruir las queratinas y debilitar la raíz del pelo.

Desmineralización: Tratamiento de aguas consistente en eliminar las materias minerales disueltas.

Desnitrificación: Pérdida de nitrógeno fijado del ambiente, al reducir los nitratos a nitritos y éstos a nitrógeno e incluso amoníaco (proceso inverso a la nitrificación). Tiene lugar en ambientes pobres en oxígeno. Los suelos desnitrificados no tienen poder retentivo ya que su marcada solubilidad hace que sean arrastrados por las aguas y pierden fertilidad. // Tratamiento terciario del agua. Rotura o digestión de los nitratos por las bacterias del suelo (*bacterium denitrifans*) produciendo la liberación de nitrógeno libre.

Desodorizar: Tratar las fuentes de emisión de olores desagradables con la finalidad de reducir las molestias olfativas mediante técnicas de filtración, neutralización, dilución, dispersión, etc.

Desorción: Proceso de recuperación de la materia adsorbida sobre un sólido o absorbida por un líquido.

Desorción térmica: Proceso térmico en el que se somete un suelo (o sólido contaminado) a temperaturas bajas (250-550℃) para conseguir la volatilización, en lugar de la destrucción de los contaminantes. Usando esta técnica se puede tratar la contaminación de los suelos por compuestos orgánicos volátiles con un peso molecular no muy elevado; como son las gasolinas o lubricantes.

Despojos: Subproductos obtenidos en la industria ganadera y en los mataderos.

Destilación: Separación de los diferentes componentes de una mezcla líquida mediante la vaporización de la parte más volátil y su condensación posterior.

Destintar: Operación de separar la tinta de la fibra del papel recuperado.

Desulfuración: Tratamiento utilizado para reducir el contenido de azufre de un combustible, de unas aguas residuales antes de ser vertidas, de unos gases antes de ser emitidos a la atmósfera. Proceso mediante el cual se elimina el azufre de un compuesto o sustancia**.**

Desvitrificación: Recristalización parcial del vidrio.

Desvolatilización: Desprendimiento de los volátiles de un cuerpo, generalmente por la acción del calor.

Desvulcanización: Operación termoquímica consistente en separar el azufre de los materiales de caucho.

Detonación: Proceso de combustión que se produce a alta velocidad generándose una onda de choque.

Deuterio: Isótopo del hidrógeno.

Dextrina: Es la sustancia amilácea disgregada y soluble en el agua. Su composición es la misma que el almidón y la celulosa, en su transformación sólo opera la acción de contacto, lo que Berzelius denominaba fuerza catalítica.

Deyecciones líquidas: Producto líquido constituido por una mezcla de deyecciones sólidas y líquidas y por restos de paja y de productos de alimentación animal en cantidades variables, generalmente con un contenido de agua superior al 85% en peso.

DG (Dirección General de Medio Ambiente): es una de las 36 Direcciones Generales y servicios especializados que integran la Comisión Europea. Su tarea principal es elaborar y definir las normativas de medio ambiente y cerciorarse de que los Estados miembros pongan en práctica las medidas acordadas.

Diagnosis ambiental orientada a la minimización: Evaluación de las posibilidades de minimización de los residuos y emisiones producidas o generadas por una actividad industrial determinada.

Dialato: Herbicida que actúa a nivel del suelo, perteneciente al grupo de tiocarbamato, usado para controlar la avena salvaje y la hierba negra en las cosechas de remolacha. Puede ser irritante para la piel y es nocivo para los peces.

Diálisis: Operación de separación de especies ionizadas de un determinado signo (cationes en membranas catiónicas o aniones en membranas aniónicas). Puede provocarse por diferencias de concentración (diálisis simple), diferencia de presión (piezodiálisis) o diferencia de potencial eléctrico (electrodiálisis).

Diáspora: Junto con la gibbsita y la boehmita son los componentes principales de la bauxita. Es un hidróxido de aluminio nativo, AlO (OH). Es desde descolorido o grisáceo-blanco, amarillento hasta en ocasiones violeta, variando de un traslucido a trasparente. Se distingue fácilmente de otros minerales debido a su hendidura perfecta y un lustre anacarado, como la mica, talco o yeso.

Diatomeas: Son organismos fotosintetizadores que forman parte del plancton (fitoplancton). Tienen un color dorado oliváceo, debido a su juego de pigmentos fotosintéticos, que incluye clorofila c1 y c2, así como carotenoides como pigmentos auxiliares. Suelen contener gotas de lípidos que, además de servir de reserva, contribuyen a su flotabilidad.

Diclofenac (o diclofenaco): Es un fármaco antiinflamatorio perteneciente al grupo de los AINEs (antiinflamatorios no esteroideos): en concreto, es un derivado fenilacético. Tiene actividad analgésica, antiinflamatoria y antitérmica. Entre los efectos adversos descritos están la elevación de enzimas hepáticas y la anemia aplásica.

Diclorvos: Insecticida y acaricida organofosforado poco persistente, usado domésticamente para eliminar con

rapidez los patógenos de frutos y vegetales cuando está cerca la época de recolección. Se han detectado especies de áfidos y arañas resistentes a este insecticida.

Dicuat: Herbicida de contacto que se usa para combatir las malas hierbas en agua estancada o muy lenta y para secar el follaje con el fin de facilitar la recolección de las patatas, de semillas de trébol, etc. Es dañino para los mamíferos.

Dieldrin: Insecticida por contacto muy empleado en los años cincuenta y sesenta, muy persistente y soluble en las grasas, un derivado clorado del naftaleno. Se usa principalmente como antipolilla. La Directiva 86/280 relativa a los valores límite y los objetivos de calidad para los residuos de determinadas sustancias peligrosas incluye esta sustancia, relacionada ya en la lista I de la Directiva 76/464. Causó efectos adversos en la parte alta de las pirámides de predación debido a su reconcentración a lo largo de la cadena trófica. En el Reino Unido estuvo en peligro de extinción, por este motivo, el halcón peregrino.

Dietilestilbestrol: es un anabolizante sintético del grupo de los estilbenos. Puede usarse como promotor de crecimiento para incrementar la masa muscular. El uso de estos promotores ha sido prohibido en la UE. Esta molécula puede presentar efectos carcinogénicos.

Difusión por movimiento: Es el proceso de mezcla más importante de la atmósfera. El movimiento de una sustancia a través de otra da lugar a una mezcla con variaciones locales de concentración.

Difusor de aire: Dispositivo situado en el fondo del reactor biológico por el cual fluye aire atmosférico en forma de burbuja con la finalidad de que se incorpore a las aguas residuales.

Digestor aeróbio: Depósito para la digestión del fango en presencia del oxígeno o aire.

Dihidrato: Sustancia que posee dos moléculas de agua**.**

Dilaceración: Operación en el tratamiento previo de aguas residuales consistente en la fragmentación y trituración de materiales sólidos en suspensión. Se trata de una depuración mecánica grosera.

Dilución: Disminución de la concentración de contaminantes en un fluido a consecuencia de su dispersión en un volumen receptor mucho más grande. Operación que tiene por finalidad la desintegración, o reducción de tamaño, de las partículas presentes en las aguas residuales.

Dimetoato: Insecticida y acaricida organofosforado sistémico que se usa en el control de la araña roja e insectos que atacan los cultivos agrícolas y hortícolas. Es venenoso para los vertebrados.

DIN: *Deutsches Institut für Normung*. Entidad Nacional de Normalización alemana, creada en 1918.

Dinitro, grupo: Insecticidas, herbicidas y fungicidas utilizados por contacto, sin ser ingeridos, como el dinoseb y el DNOC.

Dinitrobenceno: Compuesto químico sintético usado en explosivos. Es un compuesto sólido amarillo a temperatura ambiente. Puede existir en el aire en pequeñísimas cantidades como polvo o vapor, y puede disolverse en ciertos líquidos. Si esta sustancia se coloca bajo intenso calor, explotará. No tienen olor ni sabor.

Dioxano: es un éter cíclico de fórmula $C_4H_8O_2$ con un esqueleto de 4 átomos de carbono y 2 átomos de oxígeno en posiciones opuestas dentro de un haxágono. En condiciones normales se trata de un líquido volátil e incoloro. Es completamente miscible con el agua, etanol y éter.

Dióxido de cloro: El dióxido de cloro es un gas manufacturado de color amarillo a amarillo-rojizo. No existe naturalmente en el ambiente. Se usa como agente blanqueador en plantas que manufacturan papel, y en plantas de tratamiento de aguas públicas potable. Es un biocida oxidante y actúa por interrupción del transporte de nutrientes.

Dióxido: Ver *anhídridos.*

Dioxina: Cada uno de los compuestos aromáticos conocidos químicamente como dibenzo para dioxinas, (TCDD) que tienen como núcleo una estructura de tres anillos consistente en dos anillos de benceno conectados por dos átomos de oxígeno, y ocho hidrógenos que pueden ser sustituidos total o parcialmente por cloros, bromos u otros grupos. Debido a las diversas posiciones que pueden ocupar los átomos de hidrógeno y de cloro existen 75 congéneres (isómeros) posibles. De ellos hay algunos extremadamente tóxicos y otros de muy baja toxicidad. Son productos químicamente muy estables, liposolubles y no volátiles. Estas características incrementan su peligrosidad. Se producen de manera espontánea en combustiones y en la fabricación y síntesis de numerosos productos: industria del cloro, del papel, vertederos, etc.

Dique: Muro o malecón de madera, piedra, hormigón u otro material, construido como obra de contención para ríos, con el fin de mantener la corriente y el agua dentro de los límites longitudinales de protección. // Muro artificial costero o rompeolas construido para evitar que el agua inunde las tierras situadas detrás.

Disdrómetro: Instrumento que sirve para medir el tamaño de las gotas de agua de lluvia.

Disolvente: Sustancia, generalmente líquida, añadida al fabricar la pintura para hacerla más fluida. En barnices es la materia que sirve par poner en condiciones normales de viscosidad a la mezcla de gomas y aceites. // La Directiva 79/831 se refiere a la notificación, clasificación, envasado y etiquetado de sustancias peligrosas. La directiva 88/379 (Sec.3.3) es general para preparados (pinturas y disolventes) peligrosos y añade los disolventes EDC, TRI, PER y TCB. En España el Reglamento sobre Declaración de Sustancias Nuevas y Clasificación, Envasado y Etiquetado de Sustancias

Peligrosas RD 2166/85 de 23 de Octubre. Adaptaciones de la Orden 14.3.88 y 13.11.89.

Disolvente clorado: Disolvente orgánico que contiene átomos de cloro. También se utiliza en aerosoles de pintura de tráfico. Por ejemplo, clorometileno.

Dispersión tóxica: Propagación por aire o un medio acuoso de una o más sustancias peligrosas procedentes de una emisión, en la atmósfera, de una nube tóxica inflamable o contaminante y, en un medio acuoso, de un gradiente de concentración.

District heating, calefacción de barrio o urbana: Es aquella en que el calor (la energía térmica) se distribuye por una red urbana, del mismo modo en que se hace con el gas o el agua. Existen ejemplos donde se aúna el aprovechamiento energético de los residuos combustibles para generar ésta calefacción doméstica. La ventaja de este tipo de calefacción se basa en que los sistemas productores de calor de gran tamaño, tienen rendimientos mucho mayores que los pequeños, de modo que se aprovecha mejor el combustible. Por término medio, se calcula que tiene rendimientos un 10% superiores, como mínimo, a los sistemas centralizados de edificio y entre un 30 y un 40% superiores a los individuales de vivienda, lo que supone un gran ahorro de emisiones de gases de efecto invernadero.

Diversidad biológica y biodiversidad: La variedad de la vida en todas sus formas, niveles y combinaciones. Incluye diversidad de ecosistemas, diversidad de especies y diversidad genética. // Convenio; se entiende la variabilidad de organismos vivos de cualquier fuente, incluidos, entre otras cosas, los ecosistemas acuáticos y los complejos ecológicos de los que forma parte; comprende la diversidad dentro de cada especie, entre las especies y de los ecosistemas.

DL50: Concentración de contaminante capaz de producir un efecto perverso. La unidad es el DL50 o CE50, que se define como la dosis que produce la mortalidad en el 50% de los individuos.

DMS: Dimetilsulfuro. Compuesto biogénico más común del azufre.

DNA: Ver *ADN*.

DNOC: (DNC, dinitrocresol). Insecticida acaricida y herbicida de contacto, perteneciente al grupo dinitro, y que se usa para eliminar malas hierbas y los estadios reproductivos de muchos insectos y ácaros. Es muy venenoso.

Dolomía: Roca sedimentaria compuesta básicamente de carbonatos de calcio y magnesio [CaMg(CO3)2)]. Se originó por la sedimentación de caparazones de organismos del plancton marino en los océanos y por el reemplazamiento metasomático de calizas no cementadas. Aparece también en vetas minerales hidrotermales. Se encuentra muchas veces asociada a la caliza. Las dolomías se utilizan como alternativa a la magnesita en la metalurgia y en la producción de morteros y cementos especiales.

Dominio público hidráulico: Conjunto de aguas continentales superficiales y subterráneas renovable, los lechos de las corrientes naturales continuas y discontinuas, los fondos de los lagos y lagunas o embalses superficiales y los acuíferos subterráneos.

Domótica: Disciplina que se dedica a estudiar la gestión automática de los principales parámetros del hogar**:** la energía, el agua, el confort y la seguridad.

Donalson, índice de: Densidad de un fango a los 30 minutos de haber comenzado la sedimentación.

Dosímetro: Aparato que sirve para medir las dosis de radiación o las proporciones de las dosis.

DQO (Demanda Química de Oxígeno): Cantidad de oxígeno requerida para convertir (oxidar) los componentes orgánicos en formas estables, habitualmente CO_2 y agua. // Cantidad de oxígeno (mg/l) consumido en medio sulfúrico y con dicromado potásico que se necesita para la oxidación de la materia mineral y orgánica, biodegradable o no, presente en las aguas residuales.

Dragado: Cualquier forma de excavación bajo el agua o limpieza de fondo de puertos, canales, arroyos, etc. Esta succión provoca alteraciones en el ecosistema y puede matar la vida acuática. Dragar barros contaminados puede suponer un serio peligro para la vida acuática si se esparcen los metales pesados y otros productos tóxicos.

Dregs: Residuos generados en el proceso de fabricación de papel, se caracterizan por presentarse como impurezas no sulubles, muy alcalinos y son empleados para neutralizar la acidez de ciertos terrenos de cultivos.

Drenaje: Proceso natural o artificial de evacuación del agua en un área.

DSD (Duales System Deutchland): Consorcio creado en Alemania para administrar la logística y la recuperación de los envases y embalajes depositados en los distribuidores (también conocida como la ley Tófer). Concede la utilización del «*die grünen punkt*» (punto verde) a los productores de embalajes recuperables o reciclables.

DTA: Análisis técnico diferencial.

Dumper: Maquinaria pesada tipo camión, usado para el transporte de materiales minerales al interior de la zona de extracción. Camiones de gran tonelaje que se emplean en las explotaciones mineras para transportar el mineral recién arrancado.

Duna: Colina de arena movediza que en los desiertos y en las playas forma y empuja el viento.

Dureza del agua: Parámetro de calidad del agua que mide los cationes polivalentes disueltos, básicamente de calcio y magnesio.

Dureza permanente: Parámetro de calidad del agua después de someterla a ebullición y filtrada para eliminar los bicarbonatos.

Dureza temporal: Diferencia entre la dureza del agua y la permanente.

EAA: The European Aluminium Association.

ECOACERO (Asociación Ecológica para el Reciclado de la Hojalata): Es una Asociación española sin ánimo de lucro, con personalidad jurídica propia, constituida de conformidad con lo establecido en la Ley 191/64 de 24 de diciembre e inscrita en el Registro de Asociaciones del Ministerio de Interior. Fue creada el 5 de febrero de 1997.

Ecoauditoria: Véase *Auditoría ambiental*.

Ecobalance: Descripción y enumeración de los efectos más inmediatos de procesos industriales y actividades humanas sobre el entorno, que tiene en cuenta, además, el consumo de energía y la utilización de materias primas.

Ecobrick®: Material cerámico aislante que se obtiene a base de fangos de depuradora. Se ha diseñado en Cataluña (por el autor de ésta obra) y patentado sus derechos.

Ecodiseño: Proceso de creación y desarrollo para producir un nuevo objeto, teniendo en cuenta los conceptos de minimización reutilización y reciclaje. Se usa para la modificación de un producto con el efecto de reducir la cantidad de desechos generados a lo largo de su ciclo de vida.

Eco-emballages: Institución francesa creada en 1992, tiene una misión de interés general: organizar, supervisar y asesorar en la gestión de los envases y embalajes.

Ecoeficiencia: Eficiencia ambiental y económica.

Ecoembes: Sociedad Ecoembalajes España, S.A. (Ecoembes) es una organización sin ánimo de lucro que se encarga en España del Sistema Integrado de Gestión (SIG) de los envases y embalajes. Ecoembes nace en el año 1996, antes de la publicación en España de la ley 11/97 de Envases y Residuos de Envase.

Ecoetiqueta: Etiqueta homologada por un organismo oficial que identifica un producto con poca o ninguna repercusión sobre el medio de acuerdo con unos criterios previamente establecidos.

Ecoetiquetaje: Nombre que se otorga a aquellos productos y/o envases que están diseñados teniendo en cuenta consideraciones ambientales del ciclo de vida del envase.

Ecogyps: Panel absorbente acústico a partir de residuos. Esta fabricado a partir de fosfoyeso, residuo muy abundante en la industria de fertilizantes, arenas de fundición y, en menor escala, otros residuos. El conjunto se moldea en frío, por extrusión, se seca y finalmente se ceramiza a una temperatura próxima a los 1.200 ℃. Es un absorbente acústico para aplicaciones al exterior que tiene la particularidad de resistir cualquier inclemencia atmosférica.

Ecolabel: Forma parte de una estrategia con el objetivo de promocionar el consumo y la producción sostenible. ES un sistema de ecoetiquetado donde el símbolo (una flor) identifica a los productos y proporciona una orientación simple y precisa a los consumidores. Todos los productos que llevan la flor han sido verificados por organismos independientes que garantizan el cumplimiento de criterios estrictos relativos al medio ambiente y a las prestaciones del producto.

Ecología: Rama de la biología que estudia las interrelaciones existentes entre los organismos y su medio ambiente, incluyendo tanto los factores físicos como los bióticos y recalcando las relaciones interespecíficas e intraespecíficas. El término fue acuñado en 1866 por el biólogo alemán Ernst Haeckel (1834-1919), pero tiene sus raíces en las ideas relativas a la economía de la naturaleza que imperaron en el s. XVIII. Actualmente la Ecología se entiende, sobre todo, como el estudio de la relación del hombre y la biosfera, la alteración de los biotopos y ecosistemas, el estudio científico de la distribución y abundancia de los organismos vivientes y cualquiera variaciones regulares o irregulares en la distribución y abundancia y las explicaciones para esos fenómenos referidas a los factores físicos y bióticos del ambiente, y las medidas de conservación medioambiental. Desde la década de los 70, por los efectos del crecimiento demográfico y del productivismo industrial, la ecología ha alcanzado gran difusión y popularidad.

Ecología industrial: Modelo de desarrollo industrial que intenta utilizar los principios de la ecología en el diseño y la operatividad de los sistemas industriales. La ecología industrial tiene como objetivo final transformar los sistemas industriales en sistemas cerrados que reciclen la mayor cantidad posible de materiales aprovechando al máximo los recursos y con un impacto ambiental mínimo.

Ecológico, factor: Cualquier cosa del medio ambiente que afecta al crecimiento, desarrollo y distribución de las plantas y por consiguiente en la determinación de los caracteres de una comunidad de plantas.

Ecoparc: Término usado en ecología industrial para definir a un macro polígono industrial donde los residuos generados por una industria puedan ser aprovechados por otra y la energía también. // Es un complejo para el tratamiento (normalmente de residuos sólidos urbanos) que combina en un un mismo recinto varias instalaciones para valorizar los difrentes tipos de residuos.

Ecoproducción: aplicación en los procesos de producción de criterios de ecoeficiencia, es decir, eficiencia ambiental y económica.

Ecosfera: Véase *Biosfera*.

Ecosistema: Se dice de cualquier área de la naturaleza que incluya organismos vivientes y sustancias no vivientes en interacción para producir un intercambio de materiales entre las partes vivas y las no vivas, p. ej,

un estanque, un lago o un bosque. Comprende cuatro componentes: sustancias abióticas, productores, consumidores y descomponedores, y es la unidad básica funcional en ecología.

Ecotipo: Grupo subespecífico que se está adaptando genéticamente a un hábitat particular, pero que puede cruzarse con otros ecotipos o (ecoespecies) de la misma especie (o cenospecie) sin pérdida de fertilidad. En botánica, poblaciones de una especie que muestran características adaptativas asociadas a un determinado ambiente. Aunque los distintos ecotipos de una especie difieren entre sí, los cruzamientos son posibles.

Ecotono: En un ecosistema, zona de transición entre dos comunidades o biocenosis, en el que las condiciones ambientales permiten la coexistencia de especies propias de ambas.

Ecotóxico: Sustancia con propiedades tóxicas que pueden afectar al ecosistemas.

Ecotoxicológica: Ciencia que estudia los efectos tóxicos provocados por los contaminantes sobre los ecosistemas.

Ecoturismo: Turismo de la naturaleza en el que se viaja a zonas donde la naturaleza se conserva relativamente intacta con el objeto específico de estudiar, admirar y disfrutar su paisaje y su fauna y flora, así como cualquier posible aspecto cultural. Es un fenómeno bastante reciente que representa solamente un segmento de toda la actividad turística. El turismo de la naturaleza se distingue del turismo de masas y del turismo de los grandes centros por tener menos incidencia en el entorno infraestructura.

Ecovidrio: Es una asociación sin ánimo de lucro encargada de la gestión del reciclado de los residuos de envases de vidrio en toda España. En Ecovidrio están representados todos los sectores relacionados con el reciclado de vidrio: envasadores y embotelladores, recuperadores y fabricantes.

Ecuación de Bilham: Ver *Bilhan.*

Ecualización orgánica: Operación que se lleva a cabo en las EDAR para compensar las diferencias de caudal, carga orgánica, equilibrado de nutrientes y pH. La operación se realiza en un tanque de homogenización.

EDA (European Demolition Association): Institución que pretende integrar a los empresarios europeos que dedican su actividad profesional a la demolición de edificaciones en sus diversas formas, cuando voluntariamente soliciten su afiliación y cumplan con los requisitos exigidos en los estatutos de la asociación.

Edad de un fango: Relación entre la masa del fango presente en un reactor y la masa diaria de fangos en exceso. La edad de los fangos es inversamente proporcional a la carga másica.

Edafología: Del griego *edafos* (suelo) y *logos* (tratado). Ciencia que estudia la naturaleza y condiciones del suelo ~~co~~mposición, estructura, etc.~~en~~ su relación con las plantas. Es de gran utilidad para conseguir la formación de mapas de suelo que permitan lograr el máximo de producción. A base de aplicar los fertilizantes más adecuados que complementen los nutrientes del terreno estudiando, o que cubran las deficiencias detectadas en el mismo. Es de gran importancia en la mejora de la agricultura, y una de las bases fundamentales de la revolución verde.

Edafológico: Perteneciente o relativo a edafología.

EDAR: (Estación Depuradora de Aguas Residuales). Instalación destinada a la reducción de la carga contaminante existente en las aguas residuales, antes que sea vertida a un medio receptor.

EDARU: Estación depuradora de aguas residuales urbanas.

Eddy: Véase *Corrientes de Eddy*.

Edulcorante: Aditivo alimentario endulzante. // Contaminante orgánico.

(EEB) Encefalopatía espongiforme bovina: Enfermedad de las vacas locas, o encefalopatía espongiforme bovina es una enfermedad causada por priones, y que puede ser transmitida a los seres humanos a través del consumo de partes de animales infectados, sobre todo tejidos nerviosos.

Efecto acumulativo: Efecto ambiental que progresivamente se agrava al prologar en el tiempo la acción del agente inductor y al no haber mecanismos de eliminación con una efectividad temporal similar a la del aumento del agente causante.

Efecto adverso del cambio climático: Se entiende los cambios en el medio ambiente físico o en la biota resultantes del cambio climático que tienen efectos nocivos significativos en la composición, la capacidad de recuperación o la productividad de los ecosistemas naturales o sujetos a ordenación, en el funcionamiento de los sistemas socioeconómicos, o en la salud y el bienestar humanos.

Efecto fotovoltaico: Conversión directa de la energía luminosa en energía eléctrica.

Efecto invernadero: Recalentamiento global. // Aumento de la temperatura de la Tierra debido al incremento de concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono y otros gases conocidos como «gases de efecto invernadero» (metano, óxidos de nitrógeno, CFC's y ozono).

Efecto túnel: Es un fenómeno que no tiene analogía fuera de la mecánica cuántica. Se debe a la propiedad dual que la mecánica cuántica otorga a la materia de comportarse como onda o como partícula al mismo tiempo (principio de incertidumbre de Heisenberg) aprovechando este efecto, se diseñaron: el microscopio de efecto túnel de barrido y el microscopio de fuerza atómica, que logran la determinación de las posiciones atómicas en una superficie.

Eficacia de la combustión: Véase *CE*.

Eficiencia energética: Eficacia con la que se utiliza la energía de un país. Es la relación entre el consumo de energía final y el Producto Interior Bruto (PIB) del país. La eficiencia disminuye cuando el consumo de energía crece proporcionalmente más que el PIB. También se habla de eficiencia energética al referirse a un equipo que, ofreciendo iguales o mejores prestaciones de servicio, consume menos energía.

Eflorescencia: Deposición de sales solubles, generalmente cloruros, sulfatos y nitratos de metales alcalinos y alcalinotérreos. Las sales se hallan en disolución y cuando el agua se evapora aparece el residuo eflorescente.

Efluente: Aguas residuales que fluyen desde una planta de tratamiento o un vertedero.

EHE (Instrucción Española de Hormigón Estructural): Documento donde se exponen las especificaciones (materias primas, preparación y material en servicio) para hormigones y, en particular, las reglas para el uso del árido reciclado en las hormigoneras.

EIA: Evaluación de Impacto Ambiental.

El Niño: Corriente oceánica tropical que altera el clima de muchas zonas y países.

Elastano: Elastómero constituido por un 85% en masa de un poliuretano segmentado, como mínimo.

Electrocinética: Aplicación de corriente directa de baja intensidad entre un sistema de electrodos situados en el suelo. La corriente moviliza los iones, partículas y especies cargadas presentes en la solución del suelo por medio de distintos procesos

Electrocoagulación: Sistema de tratamiento de aguas residuales muy adecuado para las aguas con alta DQO y metales. El proceso combina la adición de floculantes con un campo eléctrico que acelera los procesos.

Electrodiálisis: Procedimiento para desalar el agua que aprovecha las propiedades de unas membranas excitadas por una corriente eléctrica al permitir el paso a los iones de signo determinado, mientras que se lo impide a los iones de signo contrario.

Electrodomésticos línea blanca. Tipo de electrodomésticos utilizados en la cocina para realizar labores domésticas de manera automatizada; ejemplo: lavadora de ropa, lavadora de platos, cocina, refrigerador, etc.

Electrodomésticos línea marrón: Tipo de electrodomésticos que incluyen por ejemplo los televisores, equipos de audio, entre otros.

Electroflotación: Efecto ascendente de la materia orgánica en las aguas residuales provocada por la presencia de burbujas de hidrógeno y oxígeno generadas por una electrólisis del agua con electrodos específicos.

Electroforesis: Representa el desplazamiento de las partículas coloidales cargadas que se hallan en suspensión en un líquido. Es el fenómeno que tiene un efecto menor sobre el desplazamiento de los contaminantes.

Electroimán: Es un imán que funciona gracias a la electricidad. Se compone de un material ferromagnético denominado núcleo, alrededor del cual se ubica un cable conductor de forma espiral llamado solenoide. El funcionamiento de este dispositivo se fundamenta en la ley de Ampere, de acuerdo a la cual, si se hace circular corriente eléctrica por un conductor, se creará un campo magnético a su alrededor. En el caso del electroimán, el campo generado fluirá al interior del solenoide en una misma dirección, e inducirá a las partículas del núcleo a alinearse en esta dirección, obteniéndose un imán.

Electrolito: Sustancia que, fundida o disuelta en un disolvente ionizado, se disocia dando iones y se torna conductora de la electricidad.

Electrón: Partícula elemental cargada negativamente que se encuentra en movimiento alrededor del núcleo de un átomo.

Electrón voltio: Energía que adquiere un electrón cuando en el vacío es acelerado por la diferencia de potencial de un voltio. Es la unidad de energía que se emplea en la física nuclear.

Electroósmosis: Representa el movimiento del líquido con relación a las superficies sólidas del campo eléctrico. La movilización del líquido se produce por interacción con las paredes de los espacios porosos.

Elemento: Sustancia que no puede descomponerse por medios químicos en sustancias más simples. Hay 92 elementos químicos que hoy se han aumentado con los elementos transurarianos, que se producen artificialmente.

Eliminación de residuos: Procedimientos dirigidos al almacenamiento o vertido controlado de residuos o a su destrucción total o parcial por incineración u otro sistema que no implique recuperación de energía.

Eluato: La solución obtenida por medio de una prueba de lixiviación en laboratorio.

Elutriación: Sistema de tratamiento y espesamiento de fangos de depuradora consistente en un lavado de estos con agua depurada para mejorar alguna de sus condiciones fisicoquímicas (la alcalinidad, la extracción de compuestos amoniacales, índice de cenizas más bajo). La cantidad de agua requerida suele ser dos o tres veces superior al volumen de fangos a tratar.

Eluviación: Término genérico que hace referencia a la pérdida de componentes de un terreno o de un suelo.

EMAS: *Eco-Management and audit sheme.* Sistema de gestión y verificación ambiental. Muy usado en la Comunidad Europea.

Embaladora: Máquina que produce balas o pacas de residuos.

Embalaje de transporte: Véase *Embalaje terciario*.

Embalaje reciclable: Embalaje cuya materia puede ser transformada y utilizada en la fabricación de nuevos embalajes o en otros productos diferentes.

Embalaje secundario: Embalaje que agrupa dos o más unidades envasadas para facilitar la llegada al punto de venta o para venderlas agrupadas.

Embalaje terciario: Embalaje que agrupa conjuntos de unidades envasadas, concebido para facilitar la manipulación y el transporte.

Embalse: Retención de agua creada artificialmente mediante la conducción de una presa o azud, que sirve para almacenar el agua, a fin de utilizarla posteriormente para riesgos, abastecimiento de poblaciones o producción de energía eléctrica.

Embeber: Absorber líquido por medio de un cuerpo sólido.

Emisario: Conducto que recoge las aguas residuales de una red de saneamiento, las aguas tratadas en una depuradora o el agua pluvial y las transporta a un punto de evacuación.

Emisión: Es todo fluido gaseoso, puro o con sustancias en suspensión; así como toda forma de energía radioactiva o electromagnética (sonido), que emanan como residuos o productos de la actividad humana.

Emisión difusa: Emisión que no proviene de ninguna fuente puntual.

Emisiones fugitivas: Emisiones no controladas por un sistema de captura.

Emisiones: Contaminación del aire mediante la expulsión a la atmósfera de partículas extrañas a la misma en un área y un periodo de tiempo especificadas.

Emisividad, emitancia o factor de emisión: Relación entre la radiación energética emitida por una superficie real y la emitida por un radiador ideal (cuerpo negro) a igual temperatura.

Empaquetamiento: Propiedad en que se presentan muchos minerales y suelos. El empaquetamiento viene condicionado por la forma y tamaño de los granos.

EMS (Environmental Management Systems): Conjunto de recursos, normas y procedimientos utilizados para gestionar adecuadamente las cuestiones relativas al medio ambiente en las empresas.

Emulsión: Dispersión estable de dos líquidos inmiscibles entre sí, donde uno de los líquidos (fase dispersa) se encuentra en forma de pequeñas gotas dentro del aire (fase dispersante).

Encaña: Operación de colocar ladrillos secos en el horno para su cocción.

End of pipe: término que se utiliza para denominar el final del proceso o final de una línea de proceso de tratamiento.

Endémico: Autóctono.

Endemismo: Taxón (generalmente especies pero también géneros o subespecies) endémico. Una especie endémica es aquella que sólo existe en una zona geográfica determinada, de extensión variable, pero generalmente restringida en relación con el patrón geográfico de taxones con los que se compare.

Endosulfan: (tiodán). Acaricida e insecticida organoclorado usado para eliminar ácaros y plagas de insectos. Debido a sus efectos secundarios, su uso se ha prohibido en el Reino Unido.

Endrín: Insecticida organoclorado persistente que es extremadamente tóxico para los vertebrados. La Directiva 86/280 (y modificaciones, 88/347 y 90/415) fija los valores límite y los objetivos de calidad para los residuos de endrín vertidos al agua, que deberán cumplirse a partir de 1.1.89. Además la concentración de endrín en los sedimentos, moluscos, crustáceos y/o peces no deberá aumentar de forma significativa con el tiempo.

Energía alternativa: Los principales tipos de energía renovables alternativos son la solar (térmica y fotovoltaica), eólica, geotérmica, hidráulica y biomasa. Actualmente se emplean en algunos lugares en proporción muy pequeña respecto a la energía obtenida en combustibles fósiles o la nuclear.

Energía de activación: Es la energía que necesita un sistema para iniciar un determinado proceso. La energía de activación suele utilizarse para denominar la energía mínima necesaria para que se produzca una reacción química determinada.

Energía endosomática: Aquella energía interna que procede de fuentes naturales (Un animal que se alimenta de vegetales u otros animales).

Energía exosomática: Aquella fuente de energía no renovable.

Energía final: La que se destina directamente al uso, por ejemplo la energía eléctrica es una energía final, mientras que la nuclear es una primaria).

Energía nuclear: Energía desprendida o absorbida durante las reacciones que afectan al núcleo atómico, en contraste con la energía desprendida durante las reacciones químicas, que están relacionadas con cambios de colocación de los átomos y moléculas Se pueden distinguir dos grandes grupos: las reacciones atómicas de *fisión* que suponen la rotura de núcleos pesados de átomos para dar otros más ligeros y las reacciones atómicas de *fusión* donde se juntan dos átomos ligeros para dar otro de masa mayor. En ambos casos hay desprendimiento de energía y de partículas contaminantes. Tratado EURATOM, Comunidad Europea de Energía Atómica 1958. En España el Reglamento sobre instalaciones nucleares y radioactivas aprobado por D.2869/72 de 21 de julio, que desarrolló la Ley 25/64 de 29 de abril, Reguladora de la Energía Nuclear. La Resolución del Consejo de 22 de julio de 1975 trata el funcionamiento y control de las instalaciones nucleares.

Energía primaria: Aquella que no ha sufrido aún ninguna transformación, como la energía cinética del viento o la energía radiante solar.

Energía renovable: Energía que se obtiene de fuentes inacabables o que se pueden renovar, por ejemplo, la que se obtiene del sol.

Energía solar térmica: o tambien conocida como energía termosolar. Consiste en el aprovechamiento de la ener-

gía del sol para producir calor que puede aprovecharse para la producción de agua caliente destinada al consumo doméstico, ya sea agua caliente sanitaria, calefacción, o para producción de energía mecánica y a partir de ella, de electricidad.

Enfermedad de las vacas locas: Véase EEB.

Enmienda: Enmienda de suelo. Cualquier material, por ejemplo compost, que se añade al suelo de cultivo para mejorar sus características físicas y químicas.

ENRESA (Empresa Nacional de Residuos): Empresa pública, sin ánimo de lucro, cuyos accionistas son el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) y la Sociedad Estatal de Participaciones Industriales (SEPI). Mediante el Real Decreto 1522/1984 de 4 de Julio, el Parlamento tomó la decisión de constituir una empresa pública que se hiciese cargo de la gestión de los residuos radiactivos que se generan en España y del desmantelamiento de las instalaciones nucleares.

Ensayo de Ames: Bioensayo para determinar la capacidad mutagénica de las impurezas del agua.

Entalpía: Término usado para designar el calor total contenido en un cuerpo, sea gas, sólido o líquido.

Enterovirus: Virus patógeno que se encuentran en los aparatos digestivo y respiratorio y en el sistema nervioso.

Entidad explotadora: Persona física o jurídica responsable de la gestión de una planta de tratamiento, según la legislación española. Dicha persona puede cambiar de la fase de preparación a la de mantenimiento posterior al cierre.

Entisoles: Suelos sin ningún horizonte, que se encuentran en todos los climas.

Entropía: Medida del grado de desorden. Es una magnitud termodinámica establecida para interpretar el por qué del sentido direccional de los procesos físicos y químicos y para explicar la conversión incompleta del calor en trabajo. Pérdida de energía dentro de un sistema debido a un mal funcionamiento. Por extensión, también se utiliza en las pérdidas de información de un nivel a otro.

Envase primario: Envase diseñado para constituir una unidad de venta destinada al consumidor o usuario final en el punto de venta. // Es el envase que está en contacto con el alimento o producto.

Envase secundario: Envase diseñado para transportar embalajes primarios o productos dentro de sus envases.

Envase terciario: Envase usado para el transporte de varios embalajes primarios y/o secundarios.

Enzima: Molécula, generalmente proteica, que interviene en el metabolismo de los seres vivos acelerando la velocidad de las reacciones químicas celulares. Catalizador de reacciones bioquímicas entre moléculas, actúa reduciendo la energía necesaria para cada reacción. Consiste en una proteína simple (soporte), unida a una sustancia relativamente sencilla (grupo activo), que puede ser un metal (por ejemplo, el cobre), un compuesto organometálico (la hematina), o un compuesto puramente orgánico. Agente activo de superficies y componente esencial de los detergentes (a este respecto la directiva 73/404 modificada por las directivas 82/242 y 86/94 alude a ese componente esencial de los detergentes, indicando que el índice medio de biodegradabilidad de las enzimas ha de ser superior al 80%).

EPA (*Environmental Protection Agency*): Departamento del gobierno federal de EE UU cuya misión es administrar leyes y reglas para preservar el medio ambiente. Fue creada por orden ejecutiva de 1970.

EPDs: Declaración sobre el perfil ambiental de un producto. Son herramientas de organización ambiental para las empresas teniendo en cuenta el ciclo de vida del producto.

EPER: Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes realizado el año 2002, en el cuál se dispone de información sobre las emisiones al aire y al agua de sustancias y contaminantes generadas por las instalaciones industriales incluidas en el ámbito de aplicación de la Ley 16/2002, más conocida como «Ley IPPC».

EPI (*Environmental Perforance Indicators*): Se trata de medidas absolutas o preferiblemente, relativas creadas para describir la eficacia ambiental de las actividades y de las operaciones que conllevan impactos negativos en el medio ambiente. En el campo más típico se tratará de una relación entre una medida de los efectos deseados de la actividad considerada y una medida del relativo impacto negativo en el medio ambiente.

Epicentro: Punto de la superficie terrestre situado en la vertical del foco o hipocentro de un terremoto.

Epidemiología: Estudio de las enfermedades y de cómo éstas afectan a las poblaciones, incluyendo la distribución de las enfermedades y de los factores que pueden influir a ésta distribución (edad, sexo, profesión, etc.). También tiene en cuenta la aplicación de este estudio al control de los problemas de salud.

Epifitos (as): Plantas que viven sobre otras utilizándolas como soportes para su crecimiento, pero sin establecer relaciones de parasitismo. Muchos líquenes son epifitos sobre troncos de árboles.

Epilimnion: Capa del agua cálida situada por encina del termoclina en un lago. El epilimnion está sujeto a los remolinos producidos por el viento.

Epizootía: Enfermedad que afecta a animales. Puede tener carácter epidémico o endémico (enzootía). Algunas epizootías, por ejemplo la rabia, son transmisibles a los humanos.

Epoxi: Resina epóxido obtenida por la reacción de la epiclorhidrina con una resina de novalca (fenol-formaldehido).

Epóxido: Hidrocarburo aromático policíclico derivado del benzantraceno que puede reaccionar con el ADN y tiene actividad carcinogénica.

Equitox: Unidad de medida de las materias inhibidoras. Así, 1 equito por m^3 provoca la inmovilización, en 24 horas, del 50% de la población de dafnias.

Eras de secado (o lechos): Equipos de tratamiento en el proceso de secado de los fangos procedentes de depuradora de aguas residuales. Están formados por un drenaje, normalmente constituido por tuberías de hormigón poroso o gres, así como por una capa de grava de 30 cm. de espesor y otra de arena de diferentes granulometrías con unos 15 cm de grosor. Deben eliminar el agua que todavía soportan los fangos tras el proceso de digestión.

Erosión: El descenso de la superficie del terreno por la acción atmosférica, la corrosión o el arrastre de materiales bajo la influencia de la gravedad, vientos o aguas corrientes. Así mismo, el desgaste de una línea costera por la acción de las aguas del mar. La erosión del terreno puede ser resultante de factores externos tales como los malos procedimientos de cultivo, excesiva actividad forestal y pastoreo excesivo. La erosión puede intensificarse mediante prácticas de clareo de bosques, agrícolas o mediante el desarrollo residencial e industrial.

Erradicación: Extinción completa y final de una especie a cualquier nivel.

Escala de Bacharach: Escala que consiste en un conjunto de diez placas que se oscurecen gradualmente del blanco al negro y que permite medir la opacidad de los humos retenidos por un filtro.

Escala de Richter: Escala de medida de la magnitud de los terremotos, propuesta en 1935 por Charles Richter y Beno Gutemberg. En esta escala la magnitud se define como el logaritmo decimal de la amplitud máxima, en micras, registrada por un sismógrafo estándar a 100 km. del epicentro. Por su naturaleza logarítmica, por cada aumento de magnitud en una unidad, el tamaño del terremoto se multiplica por diez, es decir, un terremoto de magnitud 5 es cien mil veces mayor que un terremoto de magnitud 1. Aunque la escala de Richter no tiene límite superior, no se han detectado terremotos de magnitud mayor que 9.

Escáner: Aparato electrónico utilizado en fotograbado para obtener directamente fotolitos con los tres colores básicos, mediante la transformación de la energía luminosa, transmitida o reflejada, en señales eléctricas, las cuales son procesadas por un ordenador que rige la insolación de las películas fotográficas destinadas a obtener las formas de impresión.

Escayola: Yeso más fino y puro que el habitual. Desde el punto de vista industrial no hay diferencia entre yeso y escayola.

Esciófilo: Organismo que requiere un hábito con luminosidad atenuada. Especie que requiere sombra.

Escombrera: Depósito que contiene una gran cantidad de material que fue sometido a diferentes procesos y/o a sustancias químicas. La escombrera queda a la intemperie, expuesta a la acción de la lluvia, el aire y el sol y los minerales con sulfatos generan con los metales pesados «drenajes ácidos de roca» que contaminan el agua de la que beben animales y hombres.

Escombreras: Depósitos de inertes y/o minerales de poca ley en las explotaciones mineras. Es el equivalente a los vertederos en el sector minero.

Escombros: Restos de demolición y de deconstrucción de edificaciones, constituidos fundamentalmente por cerámica, hormigón, hierros, madera, plásticos y tierras de excavación (tierra vegetal y rocas del subsuelo).

Escoria: Material más o menos vitrificado que aparece en la superficie de los hornos de fusión de metales. // En las incineradoras: material que se recoge en la parrilla.

Escoria de coque: El más pequeño tamaño de coque procedente de los hornos de coque, o fábricas de gas, empleado en la confección de cierta clase de mortero.

Escoria de hulla/de alto horno: Residuo final incombustible constituido por cenizas fundidas extraídas de los hornos que queman hulla o coque ~~han~~ sido quemados y requemados para consumir el máximo oxígeno~~; se~~ usa en la construcción de carreteras y como agregado para cementos.

Escorias IGCC: Subproducto obtenido en el proceso de gasificación del carbón.

Escorias LD (Linz-Donawitz): Subproductos generados por la industria de la fabricación de acero. Su composición especial, como es su alto contenido en Ca (31%), la hace susceptible de ser reciclada como enmienda en aquellos suelos de bajo pH.

Escorrentía: La descarga de un río desde una cuenca de captación. Parte de precipitaciones, nieve derretida o agua de irrigación que llega a aguas superficiales; pero no la que asciende de manantiales profundos. Puede aportar a estas diferentes tipos de contaminantes.

Esfagnos: Musgos del género *Sphagnum*, muy frecuentes en las turberas.

Esferulitas: Concentraciones esféricas o elipsoidales de cristales fibrosos y radiantes, ubicadas en una matriz vítrea o afanítica. Las esferulitas se componen generalmente de feldespato alcalino y de polimorfos de SiO_2.

Esmalte: Recubrimiento cerámico (vitrificado) de baldosas, tejas, sanitarios, vajillas, etc. Se trata de un vidrio parcialmente recristalizado.

Espacios terrestres y marítimos protegidos: Espacios naturales de importancia nacional en los cuales debe mantenerse la interacción armónica del hombre y el medio, al tiempo que se ofrece la oportunidad para el disfrute por parte del público por medio de actividades recreativas o turismo integrados en el estilo de vida y actividad económica habituales de estas zonas. Se trata de áreas de interés mixto cultural, de gran valor pai-

sajístico, donde se mantiene la utilización tradicional de la tierra.

Esparto: Es el nombre con el que se conoce en España a unas fibras obtenidas de diversas plantas silvestres del grupo de las gramíneas. Con dichas fibras se elaboran sogas, alpargatas, cestos y estropajos; la manufactura del esparto ha sido parte importante de la economía de muchos pueblos de España y, aunque ya poco significativas, aún se sigue trabajando. Sus formaciones naturales se denominan espartales, atochares y albardinales respectivamente. Ambos forman parte de la vegetación característica de los ambientes esteparios.

Espato flúor: (CaF_2). También conocido como fluoruro de calcio. Compuestos que contienen flúor. Se utilizan para incrementar la fluidez del vidrio fundido y escorias en la industria vidriera y cerámica. Es introducido dentro del alto horno para reducir la viscosidad de la escoria en la metalurgia del hierro.

Especie: Término usado en la clasificación para designar un grupo de individuos estrechamente relacionados y fecundos entre sí que ofrecen deferencias constantes con respecto a otros grupos. Se han estudiado unas 300.000 especies de plantas y de 1,5 a 2 millones de especies animales. La especie humana está constituida por todos los hombres con sus precursores fósiles hasta la edad de piedra.

Especies selectivas: Especies que se encuentran generalmente en comunidades particulares, pero que, en ocasiones, pueden encontrarse en otras comunidades más amplias e interrelacionadas.

Espectro infrarrojo: Región del espectro electromagnético comprendido entre las longitudes de onda de 0,76 a 200 micrómetros, mayores que las de la zona visible del espectro. La radiación infrarroja constituye la mayor parte de la radiación calorífica.

Espectrómetro: Apartado que produce la separación de partículas o radiaciones de una determinada característica (masa, carga, longitud de onda, etc.) y mide su proporción.

Espesadores: Parte de una EDAR donde las aguas residuales permanecen el tiempo suficiente para que el material aglomerado vaya sedimentando.

Espesamiento: En el tratamiento de fangos procedentes de aguas residuales, es el proceso que concentra los grandes volúmenes de materia seca mediante espesadores.// Hidrogenación de los aceites en presencia de un catalizador.

Espesamiento de fangos: Separación de parte del agua contenida en los fangos por gravedad o bien por flotación, con un aumento de la concentración de materia seca del fango.

Espinela: Óxidos de fórmula ideal AB_2O_4, donde A es un catión divalente y B es un catión trivalente. El óxido $MgAl_2O_4$, la espinela, da nombre a esta familia de compuestos. La estructura de la espinela se puede describir como un empaquetamiento cúbico compacto de oxígenos con los iones Mg ocupando 1/8 de las posiciones tetraédricas y los iones Al en 1/2 de las posiciones octaédricas.

Espora: Es un cuerpo microscópico unicelular o pluricelular que, sin fecundación sino por división propia, da nacimiento a nuevos organismos en vegetales criptógamos, hongos y algunas especies protozoarias llamadas esporozoarios. Es un corpúsculo reproductor, unicelular, de las plantas criptógamas y de los protozoos

Espumación: Formación de espumas en un recinto de aeración por la presencia de agentes tensioactivos o bacterias filamentosas o por otros motivos, especialmente cuando hay concentración baja de licor mezclado.

Espumas: Mezcla de gas líquido en el cual las burbujas de gas están contenidas en un volumen de líquido mucho más pequeño, que se extiende formando las paredes de las burbujas. Este sistema puede ser estabilizado con aceites, jabones o agentes emulsionantes que forma una red de cohesión en las paredes de las burbujas. La recomendación 90/437 se refiere a la reducción de CFC's utilizados por la industria de espumas de plástico.

Esquistos: Rocas metamórficas muy abundantes. Se caracterizan por su facilidad para laminarse.

Esquistos bituminosos: Esquistos con diferentes contenidosde carbón.

Esquistoso: Relativo a los esquistos, rocas metamórficas que posee esquistosidad por la existencia de planos de orientación que forman ángulo con los planos de estratificación de la roca original.

Estabilización: Parte del tratamiento biológico de aguas residuales que persigue la reducción del DBO para convertir materia orgánica activa en fango inerte y no tóxico. Es una oxidación biológica en un medio aerobio. Véase *fangos, digestión de.* // (Bot.) El establecimiento de un equilibro entre la vegetación de una localidad y las condiciones externas, especialmente de una localidad y las condiciones externas, especialmente climáticas.

Estabilización de fangos: Reducción de patógenos, olores y potencial de putrefacción de fangos.

Estabilizadores agrícolas: Sistema de control de las producciones agrícolas o ganaderas de la Comunidad Europea, cuyo objetivo es frenarlas a un nivel razonable con la reducción de los precios de garantía y el establecimiento de topes a las cantidades garantizadas. El sistema tal como se aplica en cereales, semillas oleaginosas y plantas proteínicas, se denomina de grandes estabilizadores los aplicados en las restantes organizaciones comunes de mercado. El abandono de tierras y la prejubilación son medidas complementarias.

Estabilizantes: Sustancias que son añadidas a determinadas soluciones para evitar su degradación.

Estabular: Criar el ganado en lugar cerrado de forma permanente, minimizando el movimiento de los ani-

males, para que de ese modo acelerar su engorde. La ganadería estabulada es una forma de producción intensiva, por comparación con las tradicionales a la intemperie, de ganadería trashumante.

Estación de medición: Estación establecida para medir el agua que circula por un canal estrecho. La superficie del agua, la forma del canal, la velocidad del agua circulante y la materia sedimentaria suspendida o disuelta son los factores que deben controlarse. El dato es importante para el cálculo de recursos de agua, contaminación y proyectos de irrigación.

Estación de transferencia: Instalación en la que se descargan los residuos para posteriormente poder trasladarlos a otro lugar para su recuperación, tratamiento o eliminación.

Estación de tratamiento de agua potable: Instalación en que se trata el agua para hacerla potable.

Estados de la materia: Diversas formas en que se presenta la materia: sólidos, líquidos, gases y plasma.

Estándar de emisión: Cantidad de contaminantes que la ley permite arrojar al medio.

Estándar de un efluente: Cantidad máxima de contaminantes específicos permitidos en los efluentes.

Estándares de calidad ambiental: Límites o concentraciones máximas de contaminantes permitidos en un medio concreto ~~a~~gua o aire.~~ L~~os estándares de los EE UU se basan en: 1) estimación de los valores máximos que no presentan daño a la salud humana. 2) Valores máximos que no afectan al bienestar común. Pueden ser límites de emisión o concentraciones en los productos (restos de plaguicidas o aditivos en alimentos, fosfatos en los detergentes, etc.).

Estándares de radiación: Regulaciones que establecen los niveles máximos de exposición a la población de los materiales radioactivos.

Estelómetro: Aparato que mide la resistencia del algodón.

Estenohalino: Capaz de tolerar pequeños cambios de salinidad o, lo que es lo mismo, pequeñas variaciones en presión osmótica del medio ambiente.

Estenotermo: Capaz de tolerar sólo pequeñas variaciones de temperatura del medio ambiente.

Estepas: Formaciones vegetales. Erial llano y muy extenso.

Estequiometría: estudio de las proporciones numéricas en que reaccionan químicamente las sustancias.

Estequiométrico: Es la relación que existe en las reacciones que se producen mol a mol.

Ester: Familia de compuestos químicos formados a partir de un ácido orgánico en el que se ha sustituido el hidrógeno por un grupo alkilo, arilo o aralkilo. Son sustancias insolubles en agua.

Estéreo: Medida de volumen.

Esterificación: Reacción de un ácido orgánico con un alcohol. Esta reacción se utiliza para la sintetización de ciertos biocarburantes.

Estéril: Material sin valor económico que cubre o es adyacente a un depósito de mineral y que debe ser removido antes de extraer el mineral.

Esterilización: Proceso de destrucción de microorganismos o de organismos indeseables por medios químicos, físicos o biológicos. Se aplica especialmente los residuos sanitarios.

Estero: Terreno bajo pantanoso, intransitable, que suele llenarse de agua por la lluvia o por la filtración de un río o laguna cercana, y que abunda en plantas acuáticas. // Unidad equivalente al m^3.

Estiaje: Nivel más bajo o caudal mínimo que en ciertas épocas del año tienen las aguas de un río, estero, laguna, etc., por causa de la sequía. // Periodo que dura este nivel.

Estiércol: Mezcla de excrementos sólidos y líquidos del ganado con los productos, generalmente de origen vegetal, que les sirve de cama y con otras materias orgánicas en putrefacción. Todo ello se destina al abonado de tierras por el aporte de sustancias alimenticias que completan y movilizan las sustancias orgánicas del suelo.

Estiraje superleveller: Estiraje que tiene un dispositivo que regula la uniformidad del grosor de las cintas de carda.

Estirpe (Cepa): Grupo subespecífico en el que los organismos no están bastante diferenciados genéticamente del resto de la especie como para formar una variedad.

Estoma: Diminuta abertura, ubicada en la epidermis de las hojas de las plantas superiores, que permite el intercambio gaseoso entre la planta y el exterior.

Estratificación: Formación de capas estables horizontales en la atmósfera, o de cualquier inclinación en la corteza terrestre.

Estratificación térmica: Existencia de un volumen de agua de una sucesión de capas bien diferenciadas, cada una de la temperatura diferente, y a profundidades distintas, encontrándose la de temperatura más baja a mayor profundidad. La estratificación inversa se produce cerca del hielo cuando éste cubre el agua.

Estratigráfico: Parte de la geología que estudia la disposición y caracteres de las rocas sedimentadas y estratificadas. // Disposición seriadas de rocas sedimentadas en un terreno o formación.

Estratosfera: Capa de la atmósfera terrestre, a partir de unos diez o doce kilómetros por encima de la Tierra, en la que no existen convecciones ni prácticamente gradiente vertical de temperatura. Es en esta capa donde tiene lugar una fuerte absorción de los rayos ultravioleta, formándose ozono. Junto a la troposfera, contiene el 99,9 % la masa total de la atmósfera.

Estreptococos fecales: Bacterias del grupo de los estreptococos que viven en el intestino grueso y cuya presencia en el agua indica contaminación por vertido de aguas fecales.

Estromatolito: Una especie de roca bacteriana.

Estroncio 90: Isótopo radiactivo del elemento químico estroncio (símbolo Sr). El estroncio es un metal no raro en la corteza terrestre que se presenta en minerales como la celestina (sulfato de estroncio) y la estroncianita (carbonato de estroncio).

Estruvita: Cristal de magnesio, ión amonio e ión fosfato. Se forman únicamente cuando la orina está infectada por gérmenes ureolíticos. Los cálculos de estruvita suelen ser de gran tamaño y ramificados, adaptando la forma de la pelvis y los cálculos renales

Estuario: Espacio costero acuático donde se mezcla el caudal de un río con el agua marina, especialmente afectado por las mareas.

Estudio de viabilidad: Estudio que determina las probabilidades de éxito de una propuesta. Normalmente recomienda una de las alternativas de coste-beneficio.

Estufa de secado: Instrumento para determinar la humedad de los materiales. Se basa en la introducción de una muestra de residuos inferior a 100 ℃ en una estufa con circulación forzada de aire hasta obtener un peso constante. Entonces se compara el peso de entrada y salida y se realiza el siguiente cociente: % humedad = peso en húmedo – peso seco/peso húmedo muestra × 100. Es el sistema más fiable para determinar la humedad.

Etanol: Alcohol etílico. Líquido incoloro, miscelable en el agua y mayoría de los disolventes orgánicos. Se prepara industrialmente por fermentación alcohólica del azúcar. Punto de ebullición 79,4 ℃. Propuesto por la USEPA como combustible limpio, capaz de hacer funcionar vehículos en las ciudades más afectadas por el *smog*.

ETAP: Ver *Estación de tratamiento de agua potable.*

Éter: véase *Éteres.*

Éteres: Familia de compuestos orgánicos derivados de los alcoholes (y fenoles) por sustitución del H del grupo OH por un radical alkilo o aromático. Son líquidos ligeros que se emplean como disolventes.

Etilenglicol: Líquido anticongelante que, con el uso, incorpora metales y compuestos orgánicos.

Etilómetro: Instrumento para medir el nivel de alcohol.

Etiqueta ecológica: Distingue a los productos de consumo que han sido sometidos a una valoración de impacto «de la cuna a la tumba», por un organismo competente, el cual lo refrenda con la garantía del Estado. Sus objetivos son: mejorar las ventajas y la imagen del producto, crear una conciencia en los consumidores, ofrecer una información correcta y verificada por un tercero y minimizar el impacto ambiental de sus productos y de su fabricación y proteger el medio ambiente. Reglamento ECO-LABEL 880/92, DOCE 11.4.92.

Etringita: Producto de la hidratación normal del hormigón, formado por la reacción química entre las fases aluminato del cemento, el agua, y el sulfato de calcio(yeso). La formación de etringita ocurre en la pasta y está distribuida uniformemente. Dentro del hormigón maduro expuesto a las condiciones húmedas, la etringita se encuentra generalmente en los poros y fisuras.

Eucalyptus: Árboles característicos de Australia que se han adaptado a muchos lugares de clima cálido. Las hojas contienen glándulas de aceite. Algunas especies alcanzan grandes tamaños, crecen rápidamente y son útiles como fuente de madera, aceites y gomas. Pueden plantear problemas ecológicos en las áreas donde se han incorporado, pues modifican el pH del suelo de tal forma que las otras especies de árboles y el sotobosque pueden verse afectados. Además son pirófitos; un eucalipto es más combustible que una encina. En España la introducción de estas se ha llevado a cabo como medida de reforestación ~~se~~ cortan a los 12 años y más del 90% de las hectáreas repobladas en los últimos 50 años han acogido pinos o eucaliptos~~, d~~esplazando las especies autóctonas.

Eucariotas: Organismos que presentan núcleo y orgánulos celulares membranosos diferenciados.

Euritermo: Capaz de tolerar una amplia variación de temperatura en el medio ambiente.

Eurofer: (European Confederation of Iron and Steel Industries). Es la «Confederación Europea para las Industrias del Hierro y el Acero» fundada en 1976.

Eurostat: (Oficina Estadística de las Comunidades Europeas). Es la oficina estadística de la Comisión Europea que produce datos sobre la Unión Europea y promueve la armonización de los métodos estadísticos de los estados miembros.

Eutéctico: Punto de fusión de una mezcla de dos compuestos. El punto de fusión de la mezcla es inferior a los puntos de fusión de cualquiera de ellos.

Eutrofización: Excesiva proliferación de algas y macrófitas en las aguas, por un exceso de materia orgánica. Un lago eutrófico es habitualmente poco profundo y tiene una productividad primaria considerable. Con la acumulación de materias alimentarias se eleva la producción de organismos hasta que, en casos extremos, la producción de organismos no puede utilizarse ni degradarse y se forma un lodo pútrido. Este proceso puede verse acelerado debido a actividades humanas.

Eutrofo: Medios acuáticos ricos en sales, neutros o ligeramente alicalinos. Contrario al término oligótrofos.

Evaluación de impacto ambiental: Técnica que permite introducir la dimensión medioambiental en los procesos de toma de decisión respecto a las opciones relativas a proyectos de obra o instalaciones, a fin de asegurar la mejor utilización de los recursos naturales en pro de la defensa de las repercusiones de determinados proyectos públicos y privados sobre el medio ambiente. En España, RD 1302/86 y Reglamento 30/9/88.

Evaluación de riesgos: Estimación de los riesgos a que puede estar o está sometido alguien o alguna cosa.

Evaporitos: Depósitos secundarios de minerales que se forman cuando se retira la masa de mar de un determinado paraje.

Evapotranspiración real: En una superficie de suelo determinada las pérdidas de agua por evaporación proceden de a) evaporación directa desde el suelo a la atmósfera y b) pérdida de agua por transpiración de las plantas, que previamente la absorbieron del suelo por sus raíces. Resulta útil sumar ambas pérdidas con lo que se obtiene la evapotranspiración. Se distingue una evapotranspiración potencial, que es la que correspondería a una región determinada según su clima, si las precipitaciones no fueran un factor limitante, y una evapotranspiración real, que es la que efectivamente ocurre. Así en una zona árida de temperaturas elevadas y precipitaciones escasas, la evapotranspiración potencial puede ser elevada y la real pequeña.

Exajulio: Unidad de energía equivalente a 10^{18} julios.

Exergía: Fracción de la energía desarrollada que puede ser convertida en trabajo.

Exotérmica, reacción: Cualquier reacción química que desprende calor. Se da principalmente en las reacciones de oxidación. Cuando esta es intensa puede dar lugar al fuego.

Exposición: Cantidad de radiación o de contaminante presente en un hábitat que constituye un peligro potencial para los organismos que lo habitan.

Externalidades: Son las ventajas o inconvenientes que surgen cuando una decisión de consumir o producir genera cierta incidencia positiva o negativa en el entorno. En el caso, por ejemplo, de las empresas que vierten residuos en los cauces fluviales (externalidades negativas), o las consecuencias favorables de un alto nivel educativo par la implantación de industrias tecnológicamente avanzadas (externalidades positivas).

Extracción de volátiles: Separación de las fracciones volátiles de una mezcla líquida mediante destilación o evaporación, o mediante el paso de vapor de agua, aire u otro gas a través de aquella mezcla líquida.

Extrusión: Proceso industrial que consiste en la utilización de un flujo continuo de materiales (materias primas) para la obtención de productos, generalmente metalúrgicos, plásticos y alimenticios. Las materias primas se someten a fusión parcial, transporte, presión y deformación.

Extrusora: Máquina utilizada en la industria donde las materias primas se someten a fusión, transporte, presión y deformación para fabricar productos con calidad y formas específicas.

Factor abiótico: Elemento que determina la distribución y abundancia de los seres vivos sobre la superficie de la Tierra; éste es climático, geológico, histórico y actúa a diferentes escalas temporales y espaciales.

Factor biótico: Influencia sobre el medio ambiente, resultado de las actividades de los organismos vivos.

Factor edáfico: Características biológicas, físicas y químicas del suelo que afectan a un ecosistema.

Factor limitante: Factor ambiental, como la temperatura, que restringe la distribución o actividad de un organismo o población.

Fagocitosis: Proceso por el cual las membranas pueden absorber contaminantes hasta hacerlos desaparecer.

FAMAE: (fatty acids mono alkyl ester) éster monoalquílico de ácidos grasos, que admite la sustitución del metanol por otro alcohol en la transesterificación.

FAME: (fatty acids methyl ester): Éter metílico de ácidos grasos, que incluye diversas clases de aceites y grasas animales y vegetales, así como sus mezclas.

Fango: Residuo de consistencia pastosa, más o menos cargado de agua, que proviene de la depuración de aguas usadas, de la descomposición in *situ*, de la vegetación, o de un tratamiento industrial. Contiene mucha materia orgánica. La palabra fango se usa para aquellas suspensiones en las que la materia seca es de naturaleza escencialmente orgánica.

Fango activado: Fango que contiene microorganismos en suspensión en el agua capaces de estabilizar un residuo por vía aerobia eliminando la materia orgánica carbonosa y/o nitrogenada.

Fango de depuración: Fango obtenido en la depuración de aguas residuales a partir de la separación de la fase sólida (materia orgánica e inorgánica) presente en estas aguas.

Fango deshidratado: Fango que ha estado sometido a un proceso mecánico para aumentar la sequedad.

Fango digerido: Fango que ha estado sometido a un proceso de fermentación aerobia o anaerobia con estabilización y reducción de la materia orgánica.

Fango estabilizado: Fango procedente de la depuración fisicoquímica de las aguas residuales.

Fango primario: Lodo obtenido por decantación primaria.

Fangos, digestión de: El fin de la digestión es la descomposición de la materia orgánica putrescible hasta obtener productos estables e inertes originándose durante este proceso gran desprendimiento de gas. La digestión puede ser anaerobia o aerobia. La anaerobia se realiza en ausencia de oxígeno por microorganismos anaerobios utilizándose recipientes cerrados exclusivos para este fin. La digestión aerobia, también conocida como estabilización de fangos, se basa en una aireación prolongada hasta la reducción de las materias volátiles evitando la producción de olores desagradables y consiguiendo la descomposición de los sólidos hasta lograr unos fangos prácticamente inertes.

Fangueo: Zona de cultivo completamente inundada, como el arroz.

FAO: (Food and Agriculture Organization of the United Nacions). Agencia especializada. Objetivos: elevar los niveles de nutrición y calidad de vida de los pueblos

bajo jurisdicción de los estados miembros, mejorar la producción y distribución de los alimentos y producción agrícolas, y mejorar las condiciones de vida de las poblaciones rurales. Las actividades de la FAO comprenden cuatro principales esferas: ofrecer información, compartir conocimientos especializados en materia de políticas, ofrecer un lugar de encuentro para los países, llevar el conocimiento al campo.

Fase anóxica: Parte del proceso de depuración caracterizado por la ausencia de oxígeno molecular.

Fauna: Término colectivo que se emplea para designar los animales que viven en una región.

FDA: (Food and Drug Administration). Agencia de gobierno de los EE UU que regula alimentos y productos farmacéuticos.

FEDU: Residuos de la formulación, fabricación, distribución y utilización de revestimientos (pinturas, barnices, etc.).

Feique: (Federación Empresarial de la Industria Química Española). Es el organismo de máxima representación empresarial de los intereses del sector químico, con capacidad para actuar ante la Administración del Estado, y toda clase de organismos de naturaleza pública o privada, españoles o extranjeros. Está integrada por 17 asociaciones químicas representativas de los distintos subsectores y zonas de principal implantación de la industria química y 24 empresas multisectoriales miembros directos.

Feldespatoides: Grupo de minerales formado por aluminosilicatos de sodio, potasio, calcio y litio que aparecen en lugar de los feldespatos cuando un magma con abundancia de alcalinos tiene una carencia de sílice.

Feldespatos: Son grupos de minerales constituyentes fundamentalmente de las rocas igneas aunque pueden encontarse en cualquier tipo de roca. Los feldespatos son silicatos de aluminio y de calcio, sodio o potasio, o mezclas de ellos. Su estructura consiste en una base de silicio (Si4+) en la que una parte ha sido sustituida, isomórficamente por aluminio. Al desequilibrase las cargas se compensan con cationes metálicos (K+, Na+, Ca+2).

Fenilcetonuria: Es una enfermedad genética que tiene como rasgo principal la herencia genética automosómica recesiva, es decir los padres son portadores de genes defectuosos y al ser traspasados de ambos progenitores la enfermedad se manifiesta. La causa principal es la falta de la enzima fenilalanina hidroxilasa (FAOH) o de la dihidropterina reductasa (DPHR). Se conoce desde 1934 gracias al noruego Ivar Asbjorgn Folling,

Fenol: Cualquiera de los compuestos que contienen uno o más grupos hidroxilos unidos a un anillo bencénico. Su fórmula genérica es C_6H_6OH. Se denomina también hidroxibenceno y ácido fénico. Los cresoles y naftoles forman parte del grupo. Muchos de ellos derivan del alquitrán // Es un sólido cristalino de color blanco a temperatura ambiente. Tiene un punto de fusión de 43 ℃ y un punto de ebullición de 182 ℃ / Es un alcohol que puede producirse mediante la oxidación parcial del benceno.

Fenología: Registro de la aparición de fenómenos biológicos dependientes del clima, y por tanto, con periodicidad estacional (floración y fructificación de plantas, llegada de aves migratorias, etc.).

Fentina: Fungicida orgánico con estaño utilizado para el control de enfermedades como el añublo de la patata. Las fentinas son venenosas para los vertebrados.

Fentión: Feniotrotión. Insecticida organofosforado que se usa en el control de los insectos del tipo de los áfidos y orugas en las cosechas de frutos, polillas y gorgojos en los guisantes y en los cereales; también se usa para eliminar las plagas de escarabajos en los graneros. Es venenoso para los vertebrados

Fenton: Reacción química muy usada en la depuración de aguas residuales sobre todo de industrias químicas, petroquímicas y farmacéuticas que contienen compuestos orgánicos, como bencenos, fenoles, derivados aromáticos clorados, cloraminas, DDT, PCB, antracenos, éteres, cianuros, antibióticos, mezclas de alcoholes, todos ellos difícilmente degradables, tóxicos y muy peligrosos. Básicamente consiste en usar peróxido de hidrógeno (H_2O_2) como reactivo y hierro (II) como catalizador,

Fermentación: Proceso de descomposición lenta de las sustancias orgánicas producido por microorganismos o por sustancias orgánicas nitrogenadas complejas (enzimas), de origen vegetal o animal, que no se modifican a lo largo de las reacciones químicas, la fermentación va generalmente acompañada de desprendimiento de calor y gases.

Fermentación aerobia: Fermentación que se produce en contacto con el aire.

Fermentación anaerobia: Fermentación que se produce en ausencia del aire. Da lugar al biogás.

Fermentación de residuos: Reacciones producidas en los residuos orgánicos debidas a enzimas segregadas por microorganismos.

Fermentación entérica: Proceso digestivo mediante el cual los carbohidratos son descompuestos por microorganismos en moléculas simples para ser absorbidos en el flujo sanguíneo de un animal.

Feromonas: Atrayente sexual, o repelente, que se emplea en la formulación de agroquímicos.

Ferralitización: Proceso de meteorización que afecta, principalmente, a los suelos tropicales. Consiste en la destrucción de las rocas básicas ricas en minerales ferromagnesianos.

Ferroaleaciones: Son aleaciones de hierro con algunos otros elementos además del carbón. A la ferroaleación ha sido definido por la Sociedad Americana de Metales

y el Departamento de Minería como «una aleación de hierro que contiene una cantidad suficiente de uno o más elementos químicos que son útiles como un agente para introducir esos elementos en el metal fundido, principalmente el acero»

Ferrosilicio: Aleación de hierro y silicio.

Ferrosita®: Escoria que se produce en el horno Waelz, durante el tratamiento de polvos de acería. Estas escorias constituyen un subproducto patentado por ASER.

Fertilizante: Materia que se agrega a los suelos para aumentar sus rendimientos naturales. También se llama abono. Disposiciones sin contenido ambiental, Directivas 76/116 y 77/535 modificadas por las 79/138, 89/284, 89/519 y 89/530. En España RD 72/1988 de 5 de Febrero la Directiva 76/116.

Fertirrigación: Aplicación de abonos disueltos en el agua de riego. Este sistema se lleva a cabo cuando el riego es localizado.

FGD: (Filter Gypsum Desulphuration). Residuo de yeso procedente de la neutralización de SO_2 por hidróxilo cálcico. Es muy frecuente en las centrales termoeléctricas que consumen carbón que contiene azufre.

Fibra acrílica modificada: Fibra sintética constituida por macromoléculas que contienen en su cadena entre un 35 y un 85% en masa de unidades de acrilonitrilo.

Fibra de poliamida aromática: Fibra sintética constituida por macromoléculas lineales compuestas por grupos aromáticos unidos entre ellos por enlaces amida o imida, un 85% de los cuales, como mínimo, están unidos directamente a dos núcleos aromáticos.

Fibra óptica: Conductor de luz basado en la reflexión total de la misma en el interior de hilos de vidrio. Entre otras aplicaciones, utilizados como base para cables de conducción de líneas de telecomunicaciones, reemplazando los coaxiales.

Fibrocemento: Material utilizado en la construcción, constituido por una mezcla de cemento portland y fibras, antiguamente se utilizaba el asbesto como fibra, sustituyéndolo hoy en día por otras fibras. Es empleado en la fabricación de placas ligeras y rígidas, tubos y tanques de almacenamiento de agua a nivel de vivienda particular. Las placas de fibrocemento son impermeables y fáciles de cortar y de perforar.

Fick, ley de: Regula la aportación, la velocidad de difusión, de oxígeno al agua.

FIFO: (en inglés, First in first out). Consiste en dar salida según el orden de entrada en almacenes, para evitar productos caducados.

Filler: Árido o producto equivalente, utilizado como aditivo, formado por granos que pasan por un tamiz 0,08 UNE 7050. Término internacionalizado que significa relleno.

Filtración: Forma parte del proceso de potabilización en el tratamiento de aguas. Es la separación entre sólidos y líquidos lograda haciendo pasar la mezcla a través de un medio adecuado, por ejemplo, papel, tela, lana de vidrio, materias que retienen las materias sólidas en la superficie, permitiendo que pase el líquido a través de ellas.

Filtración de membrana: Ensayo para la determinación bacteriana que consiste en filtrar el agua por un filtro de 0,45 micras de luz.

Filtrado: El líquido separado de la parte sólida después de pasar por un filtro.

Filtro: Dispositivo selectivo que transmite un margen determinado de materia o de energía atenuando sustancialmente lo demás. Puede ser manual, eléctrico, acústico u óptico. En fábricas que lanzan emisiones contaminantes, el filtro recoge, sobre todo, las partículas de polvo.

Filtro bacteriano: Recinto cerrado, recubierto por un material de alta superficie específica, por donde circula el agua que proviene de dispositivos estáticos, en sentido descendente, y se produce la depuración biológica.

Filtro banda: Filtro para la deshidratación de lodos constituidos por dos cintas transportadoras de características filtrantes colocadas una sobre la otra y acopladas a cilindros de rotación contraria, entre las cuales se pasa la suspensión de lodo.

Filtro biológico: Filtro con cubierta natural o sintética, destinado a depurar biológicamente la carga contaminante mediante la acción de microorganismos situados en la superficie de la citada cubierta.

Filtro de arena: Lecho de arena dispuesto en capas de textura decreciente, es decir, con la fina en la parte superior y las más gruesas debajo. Se emplea mucho en los abastecimientos públicos de agua y en los suavizadores por el método cal-sosa.

Filtro de vacío: Separación de las fases líquida y sólida de un agua residual donde al conjunto del filtro se le añade un sistema de vacío para facilitar la eliminación del agua por evaporación.

Filtro electrostático: Filtro de gases en que las partículas se retienen cargándolas eléctricamente y atrayéndolas posteriormente hacia una superficie de carga contraria, de la cual se desprenden por procedimientos mecánicos.

Filtro percolador: Filtro abierto constituido por un cuerpo cilíndrico vertical lleno de un material inerte (plástico o piedra) y poroso por donde circula el agua, normalmente utilizado para realizar la depuración biológica de aguas residuales, las cuales proceden generalmente de dispositivos dinámicos.

Filtro prensa: Filtro de tejido situado dentro de unos marcos colocados en paralelo, por donde pasa la mayor parte del agua contenida en el lodo sometido a presión, hasta que éste se transforma en una torta de consistencia sólida.

Finura Blaine: Medida de la finura de materiales en polvo, tal como el cemento, expresado usualmente como superficie por unidad de masa (m^2/kg).

Fique: Material compuesto elaborado principalmente para el sector automotriz, que posee características termoplásticas. Está formado por polipropileno como matriz, la fibra de fique como reforzante y un aditivo llamado copolímero de anhídrido maléico y polipropileno (MAPP).

Fire clay: Arcilla refractaria de quema castaño claro, del tamaño de grano muy pequeño y minerales mal cristalizados. El mineral mayoritario es la caolinita.

Fisher-Trosph, síntesis de: Proceso de obtención de hidrocarburos líquidos a partir de monóxido de carbono e hidrógeno, compuestos del gas de síntesis de la gasificación de materiales celulósicos.

Fisión: Escisión de un núcleo atómico en dos o más núcleos, siendo la suma de las masas inferior a la del núcleo de partida. La reacción desprende energía.

Fitodegradación: Incluye, tanto la transformación de contaminantes por los procesos metabólicos que se desarrollan en las plantas, como su transformación en el exterior con la participación de productos derivados (enzimas). Resulta especialmente idónea para el tratamiento de zonas extensas que presenten una contaminación superficial en atrazina, TCE, TNT (trinitro tolueno), DDT, HCB (hexa cloro benceno), PCP (penta cloro fenol) y dietilhexilftalato, así como nitratos.

Fitoestabilizacion: Logra la inmovilización del contaminante en el suelo a través de mecanismos de absorción y acumulación en las raíces, adsorción sobre aquellas o precipitación en la rizosfera. Previene la migración de contaminantes por el viento o el agua, así como la lixiviación o dispersión de los mismos a través del suelo, resultando especialmente eficaz en el caso de suelos de textura gruesa y elevados contenidos en materia orgánica. La fitolignificación, una forma de fitoestabilización, implica la incorporación de contaminantes orgánicos a la lignina vegetal.

Fitoextracción: Técnica basada en la absorción de contaminantes por las raíces y su posterior traslocación al interior de las plantas. Actualmente son dos las estrategias básicas de fitoextracción que se hallan en estado de desarrollo: la fitoextracción inducida, basada en el uso de sustancias quelantes para facilitar la movilización y posterior absorción, y la fitoextracción continua, basada en la utilización de plantas hiperacumuladoras y que resulta eficaz en la eliminación de metales como el zinc, el cadmio y el níquel, y formas aniónicas del selenio, arsénico y cromo.

Fitoplancton: Ver *plancton.*

Fitorremediación: consiste en el uso de sistemas verdes para el saneamiento no sólo de suelos, sino también de sedimentos y de aguas contaminadas. Reúne un conjunto de tecnologías contrastadas que permiten gestionar una gran variedad de contaminantes presentes en los horizontes más superficiales del suelo, en los sedimentos o en las aguas, entre los cuales se pueden citar: metales, metaloides, radionúcleos, hidrocarburos del petróleo, plaguicidas, explosivos, disolventes clorados y diversos subproductos industriales.

Fitosanitario: Sustancia o producto utilizado con la intención de proteger una enfermedad de las plantas. Pesticida de uso agrario.

Fitotóxica: Sustancia que causa un efecto adverso sobre los vegetales.

Fitotoxicidad: Que posee características fitotóxicas.

Fitovolatilizacion: Implica la desorción, metabolismo interno y transpiración de las plantas con la consiguiente eliminación de los contaminantes o sus metabolitos más volátiles. Paralelamente puede darse una fitodegradación de algunos de los contaminantes orgánicos.

Flatalato: Flatalato de dimetilo: derivado del ácido ftálico que se usa como repelente de los insectos. El anhídrido ftálico, derivado del ácido ftálico se usa para la preparación de resinas y fibras sintéticas.

Floculación: Operación posterior a la coagulación consistente en añadir a las aguas residuales compuestos orgánicos para que los sólidos dispersos originados por la agrupación de partículas formen agregados más densos, más pesantes y más gruesos, llamados flóculos, que hagan posible la separación del agua por decantación o por filtración.

Floculantes: Agentes (polielectrolitos catiónicos y aniónicos) que se agregan en alguna solución para facilitar la acumulación de partículas desestabilizadas y micropartículas, y posteriormente la formación de copos de tamaño deseado llamados «flóculos».

Flotación: Proceso empleado para separar por ascensión (flotación) determinados compuestos de las aguas residuales.

«Fluff»: Residuos mezclados procedentes del desguace de vehículos fuera de uso, que resultan de la separación del contenido metálico para su posterior reciclaje, son sobre todo materiales plásticos y gomas.

Fluidización: Proceso por el cual un sólido triturado pasa a comportarse como un fluido al mantenerse sus partículas en suspensión en una corriente gaseosa.

Fluido caloportador: Aire, agua u otro fluido que pasa a través de un colector o que está en contacto con él, extrayendo la energía térmica captada.

Flujo pistón: Sistema tradicional, en el tratamiento de fangos activados, que comprende depósitos de aireación alargados, a la entrada de los cuales llegan simultáneamente el agua a tratar y los fangos activados.

Fluoración: Forma parte del proceso de potabilización en el tratamiento del agua. Es la adición de fluoruros al agua de consumo público, hasta alcanzar una concentración de 1 ppm considerada óptima. Se encuentra también en aguas naturales.

Fluorescencia: Minerales que se tornan luminiscentes al ser expuestos a una fuente de rayos ultravioletas, rayos X, etc.

Fluorescente: Lámpara de descarga en que la luz se produce por la emisión de una capa de sustancias fluorescentes depositadas en el interior y activadas por la radiación ultravioleta de la descarga.

Fluorocarbonos: (FCs). Compuestos orgánicos análogos a los hidrocarburos donde uno o más átomos de hidrógeno han sido reemplazados por átomos de flúor. Anteriormente se utilizaban en Estados Unidos como propelentes en aerosoles. Hoy en día se utilizan como material de enfriamiento en algunos procesos industriales.

Fly ash: Cenizas volantes.

«Foam Glass»: Vidrio con un alto contenido de burbujas, producido por la incorporación de gases adicionales o gas formando sustancias con el vidrio fundido. El vidrio resultante es usado como un material aislante térmico y/o acústico, es fuerte, impermeable al agua y de bajo peso específico. Puede ser usado para techos en edificaciones, sistemas de drenajes o como aislante.

Foaming: Voz inglesa que literalmente significa espuma. En el tratamiento de aguas, concretamente en las depuradoras, a veces se forman episodios de generación de espuma que, simplemente, se denomina *foaming.*

FON: Unidad de la escala objetiva de intensidad del sonido. La unidad decibelio de la escala de nivel de intensidad, de 1.000 ciclos por segundo, que usa para medir la sonoridad aparente de un sonido o ruido desconocido, cuando se requiere una medida de sonoridad. Ello se efectúa por comparación subjetiva por el oído o por comparación objetiva con un amplificador microfónico y una unidad patrón.

Fondo Mundial para la Naturaleza: Creada en 1961, entre sus miembros se encuentran organizaciones no gubernamentales de cinco continentes. Así mismo recibe aportaciones de entidades privadas, entidades públicas, así como de empresas y fundaciones. Objetivos: conservar el ambiente natural y los procesos ecológicos esenciales para la vida en la tierra, contribuir a que se tome conciencia de las amenazas al medio ambiente y prestar ayuda técnica y financiera a actividades conservacionistas. Entre sus programas y actividades; protección de hábitats y especies en peligro de extinción, cursos de formación, ayudas, reservas naturales, investigación científica y campañas del medio marino, fauna salvaje, reservas y bosques tropicales. En España, ADENA fue creada en 1968 y es una de las representaciones que WWF tiene en el mundo.

Foraminíferos: Microorganismos marinos que absorben carbono atmosférico, en forma de CO_2, cuando cae como lluvia. Estos organismos transforman el dióxido de carbono en caparazón, lo que lo insolubiliza y no vuelve a evaporarse. Cuando mueren caen al fondo del mar donde se transforman en roca calcárea. Mas tarde acaba formando parte del magma volcánico que lo devuelve a la atmósfera.

Forato: Insecticida organofosforado.

FORM: Fracción orgánica del residuo municipal.

Forma de un edificio, factor de: Relación entre la superficie exterior de un edificio y el volumen encerrado por él.

Formaldehídos: (HCHO). Gas muy soluble en agua. Sustancia peligrosa presente en concentraciones bajas y que afecta a la calidad del aire en interiores.

FORSU: Abreviatura utilizada para denominar a la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbano.

Fosa séptica: Depósito, habitualmente enterrado, donde se produce la fermentación por degradación anaeróbia de la materia orgánica procedente de aguas residuales.

Fosa tectónica: Bloque enfundado limitado por dos fallas normales o sistemas de fallas normales subparalelas.

Fosfato: Cualquiera de las sales o de los ésteres del ácido fosfórico.

Fosfatos: Las sales de ácido fosfórico que forman parte de los organismos vivos. Hay tres series de ortofosfatos: la primera se produce con el agua soluciones ácidas, la segunda es prácticamente neutra, y la tercera alcalina. Se suelen asociar a los detergentes, donde se ablandan el agua reteniendo los iones de calcio y magnesio. Su vertido incontrolado produce alteraciones en el ecosistema, como por ejemplo, el crecimiento desordenado de algas.

Fosforescente: Minerales que siguen luminiscentes cuando ha cesado la luz que provocó la emisión lumínica**.**

Fosforita: Roca sedimentaria compuesta principalmente por fosfato cálcico. Se emplea como abono tras añadirle ácido sulfúrico para hacerla soluble. Suele contener trazas de uranio.

Fosforotrofización: Aporte de compuestos fosfóricos, particularmente en forma de fosfatos, con lo que se eleva el contenido de sustancias nutritivas.

Fosfoyeso: Residuo de yeso contaminado con ácido fosfórico generados en las plantas de fertilizantes que tratan fosfatos.

Fosgeno: Gas muy tóxico ($COCl_2$) que interfiere con el sistema nervioso causando una inflamación pulmonar. Se produce cuando se calientan muchos agentes desengrasantes (por ejemplo, tricloroetileno), y también en procesos de plateado de metales y en la combustión de algunos compuestos clorados (cloruro de polivinilo) si la temperatura es alta y hay CO en la atmósfera. Se usó durante la Primera Guerra Mundial. Es un importante componente químico industrial utilizado para hacer plásticos y pesticidas. A temperatura ambiente (70 ℉/ 21 ℃), el fosgeno es un gas venenoso. Si es enfriado y presurizado, el gas de fosgeno puede ser convertido en líquido, de forma que pueda ser transportado y almacenado. Cuando se libera fosgeno líquido, éste se transforma rápidamente en gas que permanece cerca del suelo y se propaga con rapidez. Al fosgeno también se le conoce por su denominación militar «CG».

Fósiles: Restos petrificados de organismos de períodos geológicos anteriores, sus huellas o productos de su actividad, que se encuentran en las rocas sedimentarias. El estudio de los fósiles permite conocer las faunas y floras de otras épocas, y deducir los tipos de ambientes en que se formaron las rocas fosilíferas.

Foso de purín: Lugar, dentro del recinto de una granja, destinado a recoger las heces líquidas.

Fotodegradable: Vulnerable a los rayos ultravioletas procedentes del sol. En el caso de ciertos plásticos, la luz debilita los polímeros y rompen las cadenas en unidades más cortas.

Fotodegradación: Véase *Fotodegrable y* Véase *PP.*

Fotólisis: Disociación de moléculas orgánicas complejas por efecto de la luz. Es el proceso en el que se basa la fotosíntesis.

Fotón: Paquete de energía asociado a las ondas electromagnéticas. Los rayos X y la radiación gamma están formados por haces de fotones.

Fotosíntesis: Proceso bioquímico por el cual las plantas verdes pueden tomar energía de la luz solar, para elaborar sustancias orgánicas carbohidratos simples a partir de dióxido de carbono y agua, con desprendimiento de oxígeno. El proceso tiene lugar sólo cuando la planta dispone de suficiente luz, actuando la clorofila como un transformador de energía que permite a la planta hacer uso de la luz como fuente de energía.

Fotovoltáicos, paneles: Están formados por numerosas celdas que convierten la luz en electricidad. Las celdas a veces son llamadas células fotovoltáicas, que significa «luz-electricidad». Estas celdas dependen del efecto fotovoltáico para transformar la energía del Sol y hacer que una corriente pase entre dos placas con cargas eléctricas opuestas.

Fouling: Atascamiento, el término se aplica a describir el ensuciamiento de las partículas resultantes en la superficie de las membranas de tratamiento de agua.

Fraguado: Endurecimiento de algunas mezclas que se usan en construcción

Fraude, número de: En el cálculo de decantadores el número adimensional de Fraude sirve para apreciar la estabilidad de un proceso circulatorio cuando el flujo está influenciado principalmente por la gravedad y las fuerzas de inercia.

Freático: Relativo o perteneciente a las aguas subterráneas. Capa del subsuelo terrestres que contiene agues subterráneas aprovechables.

Freón: Véase *Freones*.

Freones: Nombre comercial de ciertos hidrocarburos fluorados utilizados por sus propiedades frigoríficas o como líquidos de dispersión para insecticidas, propelentes de sprays. En un principio se llamó con este nombre a los primeros derivados de cloruros del metano y el etano. Más tarde se amplió a todo refrigerante de la familia de los CFCs. Tienen gran estabilidad frente a los agentes químicos y tendencia a migrar hacia la estratosfera sin reaccionar con las especies químicas hasta su encuentro con el ozono estratosférico que reacciona con ellos

Frigoría: Símbolo fg. Unidad de medida de absorción de calor empleada en la técnica de refrigeración. Corresponde a la absorción de una kilocaloría, cantidad de calor que es necesario sustraer a un kg de agua para que su temperatura descienda de 15 a 14 ℃.

Frita: Vidrio prefundido, sobreenfriado inerte, siempre que la composición sea correcta.

Ftalatos: Grupo de los compuestos químicos que se utilizan principalmente como plastificantes sustancias agregadas a los plásticos para aumentar su flexibilidad. Se utilizan principalmente para convetir el cloruro de polivinilo (plástico duro) en plástico flexible. Los ftalatos, también conocidos como ésteres de ftalato, son dialquilésteres o alquilarilésteres de ácido 1,2-bencenodicarboxílico.

Fuel: Término inglés que significa combustible.

Fueloil: Destilado pesado del petróleo utilizado como combustible primordialmente en el sector industrial.

Fuente de emisión: Instalación a través de la que se vierten o emiten contaminantes. También se utiliza para designar cualquier frente indentificable como contaminante.

Fuente móvil: O foco emisor móvil de contaminación de aire. Se refiere básicamente a vehículos de transporte como automóviles, camiones, motos y aviones.

Fuentes de emisión estacionarias: O focos fijos de emisión de contaminantes, inamovibles. Normalmente el término se refiere a instalaciones industriales.

Fuentes difusas: Fuentes de contaminación que tienen más de un punto de emisión o que no están canalizadas en ningún punto de salida. Los contaminantes son normalmente arrastrados por el agua de lluvia.

Fuerzas de Van der Waals: Fuerzas de estabilización molecular; forman un enlace químico no covalente en el que participan dos tipos de fuerzas o interacciones, las fuerzas de dispersión (que son fuerzas de atracción) y las fuerzas de repulsión entre las capas electrónicas de dos átomos contiguos.

Fumigación: Incremento rápido en la contaminación del aire a nivel del suelo, dando lugar a concentraciones de contaminantes muy altas durante una hora o más. El fenómeno se produce cuando una inversión nocturna de temperatura ha causado un gran acumulación de contaminantes del suelo e inicia corrientes de aire ascendentes que hacen que los contaminantes acumulados por la inversión caigan y no se dispersen fuera del lugar. La turbulencia limpia gradualmente el aire desde la parte superior de la inversión hacia las capas bajas, diluyendo los contaminantes. // Técnica empleada para aplicar plaguicidas en un espacio cerrado en forma de humo.

Fumigantes: Son pesticidas tóxicos que se aplican en forma gaseosa para eliminar plagas en el suelo antes de plantar cultivos.

Fundente: Sustancias minerales, o químicas, que se añaden a una composición para que funda a menor temperatura.

Fundido: Material resultante del desmoronamiento de una estructura sólida cristalina por la acción del calor. Todas las sustancias cristalinas tienen punto de fusión, mientras que los materiales prefundidos al tener una estructura total o parcialmente amorfa, carecen de esta propiedad.

Fungicida: Sustancia pesticida utilizada para controlar, prevenir destruir los hongos perjudiciales, en enfermedades fungicidas.

Furanos: Fórmula genérica C_4H_4O aunque los diversos isómeros forman una amplia familia. Líquido muy volátil, con 157 isómeros. Contaminantes atmosféricos procedente de combustiones y también se halla en los alquitranes de la madera de pino. Las directivas 89/369 y 89/429 relativas a la prevención y reducción de la contaminación atmosférica procedente de instalaciones (nuevas y existentes) de incineración de residuos municipales incluyen valores límite para furanos y dioxinas.

Furfural: Derivado aldehídico del furano. Se obtiene a partir de productos ricos en azúcares (pentosas) y se usa como disolvente.

Fusing: Expresión inglesa usada para denominar la deformación o conformación que experimenta el vidrio cuando se somete a temperatura.

Fusión nuclear: Reacción nuclear, producida por la unión de dos núcleos ligeros, que da lugar a un núcleo más pesado, con gran desprendimiento de energía.

Gallinaza: Producto semisólido o sólido constituido por una mezcla de las deyecciones sólidas o líquidas de las aves, sueltas o mezcladas con la paja, restos de productos de alimentación y cantidades variables de agua.

Galvanoplastia: Técnicas de recubrimiento de superficies mediante electrodeposición de metales.

Gammagrafía: Es una prueba diagnóstica que se basa en la imagen que producen las radiaciones generadas tras la inyección o inhalación en el organismo de sustancias que contienen isótopos radiactivos. La emisión radiactiva es captada por un aparato detector llamado gammacámara el cual procesa los datos recibidos que posteriormente y mediante tratamiento informático servirán para formar una imagen tridimensional.

Ganancia solar directa: Radiación solar directa que pasando a través de las áreas acristaladas contribuye al calentamiento del espacio interior.

Ganancia solar indirecta: Transferencia de energía solar al espacio a calentar, a través de un colector unido a dicho espacio, mediante un medio transmisor de calor. Ejemplos de estos colectores son los muros o techos de almacenamiento térmico.

Ganga: Mineral sin valor que acompaña a los minerales metálicos.

Gas azul de agua: Combustible mezcla aproximadamente a partes iguales de monóxido de carbono e hidrógeno, obtenido haciendo pasar vapor de agua sobre coque incandescente en generadores especiales. La potencia calorífica por m^3 es de 2.600 kilocalorías.

Gas de altos hornos: Combustible de escaso poder calorífico, producto secundario de los procesos de obtención del hierro, que se usa para calentar el aire. Puede contener hasta un 30% de monóxido de carbono y tiene una potencia calorífica aproximada de 950 kilocalorías por m^3.

Gas de cloaca: Gas combustible generalmente autoquemado, recogido de los tanques de digestión de fangos de EDAR. Gas con muy baja propagación de llama, con potencias caloríficas que se extienden desde 5.800 a 6.700 kilocalorías por m^3.

Gas de hulla: Gas obtenido industrialmente por carbonización de las hullas bituminosas en las fábricas de gas de alumbrado, sea en hornos de coque o por carbonización a baja temperatura.

Gas de petróleo: Gas de elevada potencia calorífica obtenido por destilación de aceites minerales de alto punto de ebullición. Consiste principalmente en metano, etileno, acetileno, benzol y homólogos, de número de carbono más elevado.

Gas licuado del petróleo: Mezcla de hidrocarburos ligeros, básicamente propano y butano, gaseosos en condiciones normales de temperatura y presión, llevado al estado líquido.

Gas mostaza: Dicloro-dietil-sulfato. Agente químico mutagénico y cancerígeno, usado en la primera guerra mundial.

Gas naranja: Herbicida defoliante que fue utilizado por el ejército americano para clarear de vegetación las zonas de guerrilla en Vietnam. Cuestionado tanto por su utilización, como por los posteriores efectos en aquellos que estuviesen expuestos. (Ver TCDD.)

Gas natural: Combustible fósil que se extrae de formaciones geológicas. Se designan los gases que se producen durante la actividad volcánica, así como los hidrocarburos gaseosos destilados bajo condiciones naturales por los aceites minerales acumulados en estratos porosos, éstos últimos en regiones en que existen pozos petrolíferos. El componente principal del gas natural suele ser el metano CH_4, aunque se conocen gases naturales compuestos por dióxido de carbono y ácido sulfhídrico. En las condiciones de reserva bajo la superficie, algunos gases naturales son líquidos. El gas natural puede ser transportado por tuberías, o bien en forma de gas natural licuado (GNL) en bombonas de gas.

Gas pobre: Mezcla de gases de poder calorífico bajo, cuyos principales componentes son el hidrógeno y el

óxido de carbono. Se produce por la acción del vapor de agua y el aire sobre el carbón incandescente. // Gas procedente de la gasificación de los residuos leñosos mediante técnicas adecuadas.

Gas residual: El gas pesado incombustible (dióxido de carbono) que queda después de una explosión en una mina de carbón. El principal producto gaseoso obtenido en la combustión es gas de hulla.

Gas: Combustible para uso doméstico o industrial, producido a partir del carbón o en campos de gas natural.

Gases de combustión: Véase *Humos de combustión*.

Gases de efecto invernadero: Aquellos componentes gaseosos de la atmósfera, tanto naturales como antropógenos, que absorben y reemiten radiación infrarroja. Permiten el paso de la luz a través de la atmósfera mientras impiden que la radiación infrarroja de la tierra pueda escapar. Se trata de gases como dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno, metano, CFC y gases naturales como el ozono o el vapor de agua, cuyas concentraciones pueden ser afectadas por las interacciones en una atmósfera contaminada.

Gases generadores de lluvia ácida: Sustancias químicas gaseosas como los óxidos de azufre y nitrógeno que se vierten a la atmósfera donde pueden formar ácidos.

Gases raros: Gases nobles. Los elementos del grupo 0 del sistema periódico; helio, neón, argón, criptón, xenón y radón. Prácticamente no presentan tendencia a combinarse con otros elementos y, con excepción del radón, pueden todos obtenerse del aire atmosférico.

Gases, separación de: Proceso de tratamiento de gases en el que para separar los contaminantes se pueden utilizar diferentes técnicas; absorción, en el que el contaminante puede reaccionar con el líquido absorbente o disolverse en él; adsorción (véase *Adsorción*); combustión cuando los contaminantes son oxidables y se eliminan mediante incineración o combustión catalítica; reducción catalítica, que supone el paso de los contaminantes a formas más reducidas mediante catalizadores.

Gasificación de residuos: Proceso por el cual los residuos con un contenido elevado de carbono son convertidos en un combustible gaseoso.

Gasoducto: Tubería para la conducción de gas de usos industriales o domésticos.

Gasóleo: Fracción destilado medio del petróleo crudo que sigue al queroseno. Punto de inflamación 76 ℃; se utiliza como combustible en la calefacción doméstica, para carburar el gas de agua en las fábricas de gas y como combustible en los vehículos diesel. Se purifica especialmente para eliminar el azufre. También se llama aceite diesel, aceite solar y aceite de gas.

Gasolina: El producto líquido más ligero obtenido en la destilación fraccionada del petróleo o de los aceites hidrocarburados sintéticos, con contenido mínimo de azufre. Peso específico (a 15 ℃), alrededor de 0,745, y los puntos de inflamación varían a su vez 21 ℃ a 38 ℃. El combustible en general es una mezcla de gasolina natural y redestilada y se usa en motores ligeros de explosión. El Decreto 2204/75 de 23 de agosto fijó por primera vez en España las características, calidades y condiciones unificadas por las gasolinas 90, 96 y 98 octanos, los gasóleos de las clases A, B, C, el fueloil pesado de los tipos 1 y 2 los carbones. Fijó también los límites de azufre, cenizas y plomo de cualquier proceso de combustión.

GATT: (General Agreement on Trade and Tarifs). Acuerdos comerciales internacionales actualmente en curso de negociación ha tomado el nombre del país en el cual se empezó. La cuestión ambiental tiene gran importancia en las negociaciones para el GATT.

Gehlenita: Silicato alumínico cálcio insoluble y de gran resistencia mecánica. Ver *Gelenita*.

GEI (Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático): Creado por la iniciativa de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) después de la Conferencia de Toronto para la Protección del Clima para las Generaciones Presentes y Futuras de la Humanidad. Fue creado con la finalidad de evaluar los aspectos científicos y socioeconómicos para la comprensión del riesgo de cambio climático inducido por los seres humanos y de las opciones de mitigación y adaptación. Está constituido por 2.500 científicos y expertos.

Gel: Estado que adopta una materia en dispersión coloidal cuando flocula o se coagula.

Gelatinas: Es una proteína, es decir, un polímero compuesto por aminoácidos. Esta proteína carece de los principales aminoácidos como valina, tirosina y triptófano, y por lo tanto no tiene valor como alimento. Es una proteína compleja obtenida a base de residuos animales hervidos con agua que sirve como medio para unir los diferentes productos químicos que forman la emulsión sensible. Sirve también como capa de protección de la emulsión y tiene unas propiedades frente a temperaturas diferentes: se hincha con el agua fría y se funde con el agua caliente.

Gelenita: Sílico aluminato cálcico de fórmula ($2CaO*Al_2O_3*SiO_2$), presente en muchos materiales cerámicos.

GEMI: (Global Environmental Management Iniciative). Organismo que recoge un determinado número de grandes sociedades estadounidenses con el objetivo de la dirección del negocio en el tema ambiental. Coopera con la UNEP para el control de los daños medioambientales a nivel mundial y su evaluación. La recogida de datos se realiza a través del programa GRID.

Generador fotovoltaico: Conjunto de todos los elementos que componen una instalación fotovoltaica necesarios

para suministrar la energía eléctrica a partir de la luz solar.

Generador, dinamo: Máquina que convierte la energía mecánica de rotación en energía eléctrica a través del fenómeno de la inducción electromagnética.

Genética: Parte de la biología que estudia la transmisión de la vida y la herencia biológica.

Genotipo: Información genética contenida en el código masa hereditario. // Grupo de individuos, todos los cuales poseen la misma constitución fundamental.

Geocélulas: Estructuras muy resistentes a base de tiras de polietileno de alta densidad en forma de nidos de abeja usadas para la protección de taludes.

Geoda: Cavidad rocosa con paredes gruesas.

Geodesia: Ciencia matemática que tiene por objeto determinar la figura y magnitud del globo terrestre o gran parte de él y construir los mapas correspondientes.

Geoesteras: o geomatrices: mantas que se emplean para el control de la erosión. Normalmente contienen material vegetal en su seno.

Geofísica: Parte de la geología que estudia la física terrestre.

Geofono: Detector de una onda sísmica.

Geología ambiental: Aplicación de los datos geológicos a la solución de problemas creados por la ocupación humana o cualquier actividad (los efectos de la extracción minera, la construcción de depósitos sépticos, la erosión de superficies, etc.).

Geomembrana: Lámina impermeable y flexible, generalmente de plástico, utilizada en la construcción de depósitos, vertederos, etc., para hacer balsas para la agricultura, abastecimientos, lagunas de aguas residuales, vertederos de residuos, etc.

Georedes: Estructuras de dos o tres capas de filamentos paralelos entretejidos que crean canales de gran capacidad de drenaje.

Geosintético: Producto planar manufacturado a partir de un material polimérico usado en fundaciones, suelo, roca o tierra, o cualquier otro material relacionado con la ingeniería geotécnica, que forma parte integral de un proyecto, estructura o sistema elaborado por el hombre.

Geostrófico, viento: Aproximación matemática de la frecuencia y velocidad del viento real que se emplea en los cálculos de los parques eólicos.

Geotextil: Lámina permeable y flexible utilizada en la construcción del objetivo de impedir la mezcla de materiales constitutivos de diferentes capas o para proteger una determinada capa contra el punzamiento.

Gestión de residuos: La recogida, el transporte, el almacenamiento, la valoración, la eliminación y comercialización de los residuos, incluida la vigilancia de estas operaciones, así como la vigilancia de los lugares de descarga después de su clausura o cierre. No se considera gestión de residuos la operación de reciclaje en origen de los residuos que se incorporan al proceso productivo que los ha generado.

Gestión medioambiental: Aquellos aspectos de la función de gestión general que determinan y permiten llevar a cabo la política medioambiental.

Gibbsita: Es un mineral de clase de los hidróxidos que se debe su nombre al coleccionista americano G. Gibbs.

GICC: (Central de Ciclo Combinado con gasificación Integrada).

Gill: Estiradora que se utiliza en la hilatura de estampación y que está constituida por dos pares de cilindros, entre los cuales hay un lecho de agujas que sirve de guía a las fibras durante el estiraje.

Gimnospermas: son plantas vasculares y productoras de semillas. Este término se aplica debido a que las semillas de estas plantas no se forman en un ovario cerrado (esto es, un pistilo con uno o más carpelos que evolucionan a un fruto, como ocurre en las angiospermas), sino que están desnudas en las escamas de los conos.

Glacis: Llanura cubierta de aluviones que se extiende desde el pie de una zona montañosa. En la zona de contacto con el relieve la pendiente es mayor y al aumentar la distancia a aquél, disminuye.

Glasfalto: Un material para pavimentar que es muy parecido al asfalto. Es compuesto de betún y vidrio de desecho, en vez de petróleo y grava.

Gleysol: Suelo intrazonal. Es un suelo acuoso. Sus horizontes superiores son ricos en humus, por encima del nivel freático se acumulan compuestos ferruginosos insolubles, por debajo de este nivel se acumulan compuestos ferruginosos solubles que forman un horizonte pardo característico denominado horizonte gley o G.

Glicerina: También denominado como propanotriol o glicerol ($C_3H_8O_3$), es un alcohol con tres grupos hidroxilos (OH). Es uno de los principales productos de la degradación digestiva de los lípidos en el curso del ciclo de Krebs. Se produce también como un producto intermedio de la fermentación alcohólica. Dentro de los principales usos se encuentran la elaboración de cosméticos, y la elaboración de medicamentos en forma de jarabes (como excipiente).

Glicerol: Alcohol glicílico: 1-2-3 propanotriol. Líquido siruposo, claro, incoloro e inodoro. Higroscópico y soluble en agua. Subproducto que resulta de la fabricación del biodiesel y del jabón.

Glicol: o Etilen-glicol, se emplea como disolvente y anticongelante.

Glicólisis: proceso dentro del reciclado de plásticos. Es también denominado alcohólisis. Consiste en la despolimerización por reacción con etilenglicol para reducir la larga cadena polimérica a oligomérica.

Glúcidos: Hidratos de carbono.

Gneis: Roca metamórfica, formada principalmente por feldespato, cuarzo y mica y, accesoriamente por granate, cordierita, sillimanita y hornblenda, de coloración muy

variable, generalmente gris claro a gris oscuro, parduzco o verdoso, de grano medio a grueso, algunas veces con inclusiones de fenocristales de feldespato, a menudo con zonaciones en bandas claras y oscuras. Se origina por metamorfismo regional de sedimentos arcillosos (paragneis), o por metamorfismo de granitos (ortogneis). Se emplea como material de construcción.

Golpe de ariete: Sobrepresión que se produce en una conducción cuanto de repente se cambia la velocidad del fluido que circula.

Gota fría: Depresión atmosférica cerrada en las partes mediana y alta de la troposfera, que coincide con un mínimo de temperatura del aire y que no se detecta en un mapa de superficie.

Grado francés: Unidad de medida de la dureza del agua equivalente a 10 mg $CaCO_3$/l.

Grado hidrotimétrico: Simbolizado por TH, indica el contenido total de sales de calcio y magnesio que hacen el «agua dura».

Grafito: Es una de las formas elementales en las que se puede presentar el carbono. Otras formas son el diamante y los fullerenos. El grafito se encuentra en la naturaleza y se puede extraer, pero también se produce artificialmente.

Granalla: Escamas para proyectar. Generalmente se emplean en medio acuoso para limpiar superficies.

Grancear: Mecanismo mediante el cual los residuos plásticos con convertidos en partículas del tamaño de una lenteja.

Granito: Es una roca plutónica constituida esencialmente por cuarzo, feldespato y mica. Es la roca más abundante de la corteza continental. Se produce cuando magma con alto contenido en sílice es creado bajo los continentes por fusión de las rocas que los forman, sometidas estas al calor del manto. Se utiliza ampliamente en construcción desde la prehistoria gracias a la tenacidad del material y su resistencia a la erosión, comparado con otros tipos de roca (especialmente la caliza que es frágil y soluble)

Granja solar: Posibilidad de utilización de extensas áreas del desierto con el fin de obtener grandes cantidades de energía eléctrica a partir de la energía solar.

Granuladora: Máquina que se utiliza para fabricar un producto con una forma geométrica determinada.

Granulometría: Análisis de distribución de tamaño de partícula de un sólido pulverulento.

Granza: Material plástico en forma de granos o cilindros perforados, que se utilizan para fabricar objetos de plástico reciclado.

Grasa: Triglicérido o triéster de glicerol y ácidos grasos. Las grasas son sustancias lipófilas e hidrófobas, esto es, insolubles en agua y solubles en disolventes orgánicos. Las grasas animales suelen contener ácidos grasos saturados y ser sólidas a temperatura ambiente. Las grasas vegetales suelen contener ácidos grasos insaturados y tener menor punto de fusión, por lo que son líquidas a temperatura ambiente, en cuyo caso se les acostumbra a denominar aceites. En los seres vivos, las grasas son sustancias energéticas y de reserva. Son un componente importante de la dieta.

Graveras: Extensiones de terreno que deja la explotación de canteras. Contienen áridos naturales sueltos, generalmente silíceos, pero también calizos.

Gray: Unidad de dosis radioactiva absorbida. 1 gray equivale a la absorción de 1 joule en la masa de 1 kilo.

Greda: Piroclastas roca de 2 a 64 mm.

Greenpeace: Grupo ecologista fundado en 1970 cuando un grupo de jóvenes canadienses intentó detener unas pruebas atómicas en Alaska. Actualmente trabaja de forma activa en muchos países y su principal objetivo es divulgar un concepto más equilibrado entre ecología y progreso. Realiza campañas internacionales contra todo lo que considera un peligro contra el planeta y sus habitantes.

Gresificación: Proceso de fabricación cerámico que se distingue por obtener un material con una capacidad de absorción de agua inferior al 3%, lo que la hace idónea para la valorazión de residuos inorgánicos.

GRID: (Global Resource Information Database). Es un programa de la Unep dirigido a recoger datos sobre el medio ambiente a nivel mundial. Forma parte del Gemi y ha sido instituido en 1985. Tiene tres nodos principales en Nairobi, Ginebra y Bangkok, responsables de reunir los datos relevantes. Al principio de 1991 había sistemas de acceso de 15 países.

Grifts: Residuos generados en el proceso de fabricación de papel, se caracterizan por presentarse como materia esponjosa y liviana, muy alcalinos y se emplean para neutralizar la acidez de ciertos terrenos de cultivos.

Grisú: Gas combustible que emana naturalmente de ciertas clases de hullas. En general, es una combinación de metano y otros hidrocarburos; forma mezclas gaseosas explosivas en combinación con el aire.

GROC: Polvo cerámico ya cocido procedente de la molienda de desechos o producto no conformes de la propia indsutria.

Grumosol: Suelo compuesto principalmente por arcilla, que se hincha en la época húmeda y se cuartea en tiempo seco.

Guaipe: Nombre que se le da a un tipo de paño que se fabrica a partir de fibras de textil y que son muy usados en el ámbito de la reparación y manutención de maquinaria.

Guano: Depósitos de excrementos de aves, usados como fertilizantes del suelo. Suelen encontrarse casi exclusivamente en islas o cerca de las costas, especialmente en la costa oeste de América del Sur.

Gunitar: Proyectar mortero u hormigón a presión sobre una superficie mediante una manguera que transporta el material, propulsado por aire comprimido.

Gunite: Sistema de construcción que consistente en proyectar con un cañón-manguera a alta presión hormigón o cemento para poder revestir cualquier tipo de superficie, de manera que se consigue un muro continuo, con mayor resistencia y fuerza para soportar y contener la presión ejercida por cualquier tipo de pendiente, etc. Una de las ventajas de esta técnica es una mayor resistencia por metro cuadrado, es decir, con menos material mayor resistencia.

Hábitats: Espacio de vida de una colectividad, en el sentido de su entorno natural y social, incluyendo vivienda, áreas de esparcimiento, centros comerciales, etc. Su mejora contribuye a fijar la población en los casos de las condiciones más difíciles para el trabajo. // Lugar, entorno o tipo de ambiente en el que existen naturalmente un organismo o una población.

Halocarburos: Contaminante halogenado/ Numerosos compuestos entre los que destacan los clorofluorados, CFC, en cuya composición aparece el flúor y el cloro, y los halones, que contienen bromo. Entre los primeros, los más importantes son el CFC11 y el CFC12. Por sus características (bajo punto de ebullición y no tóxicos ni inflamables), se ha generalizado su uso como disolventes, en la conservación de alimentos, cosmética, fabricación de espumas, chips y en la industria del frío. Su proporción en la atmósfera es muy pequeña (0.5 ppmmv: media parte por mil millones de volumen) y durante mucho tiempo se les ha conocido más como destructores de la capa de ozono que como gases de efecto invernadero. Su larga permanencia en la atmósfera (80 años para CFC11, 170 para CFC12 y hasta 400 para el CFC13) y su alta capacidad de absorción en las bandas del infrarrojo, determina que su contribución al calentamiento global sea del 24% (17% los CFCs 11 y 12 y el 7% otros CFCs), el segundo en importancia tras el CO_2.

Halófilas: Microorganismos adaptados a aguas muy salinas, como el Mar Muerto.

Halófitos: Plantas que viven en suelos salinos. En muchos casos se trata de especies que soportan la salinidad y ocupan el hábitat salino por exclusión de otras especies, pero en otros casos se trata de especies que necesitan concentraciones elevadas de sal.

Haloformos: Trihalometanos, perteneciente a la familia de los hidrocarburos halogenados.

Halógenos orgánicos adsorbibles: Parámetro que se utiliza para determinar con carbono activo los halogenados orgánicos adsorbibles de una muestra de agua.

Halón: Compuesto orgánico de la familia de los clorofluorocarbonos que contienen bromo. Se encuentran como estructuras empaquetadas en un enrejado tridimensional.

Haluros: Sales formadas por halógenos y metales.

HAP: (Hormigones de Alta Prestación). Comprende elevada durabilidad, excelente comportamiento en servicio. Este material es utilizado para construir contenedores para residuos radioactivos de media actividad.

HAR: (Hormigón de Alta Resistencia). Dícese de aquel hormigón que posee características mecánicas superiores a las convencionales. El límite de la resistencia a la compresión convencional resulta algo relativo y ha evolucionado con el paso del tiempo, sobre todo por el avance tecnológico.

«Hard organics»: Material orgánico sintético que incluyen: los disolventes, pinturas, farmacéuticos, pesticidas, etc. Pueden ser difíciles de tratar. Los métodos de tratamiento son generalmente específicos según el tipo de material. Estos métodos son: destilación, adsorción, incineración, inmovilización química o disposición final.

Harina de sangre: Se obtiene por deshidratación de la sangre proveniente de los mataderos y se utiliza principalmente como ingrediente en la fabricación de raciones para cerdos, aves y peces. Desde el punto de vista nutricional, es una fuente muy concentrada en proteínas, conteniendo valores superiores al 80%.

HCH: Hexaclorociclohexano. Producto químico estrictamente reservado a determinados usos a causa de sus efectos sobre la salud humana y el medio ambiente. La Directiva 84/491 establece valores límite, objetivos de calidad, plazos, métodos de medición y procedimientos de control para los vertidos. la Orden de 12 de Noviembre de 1987 adaptó la legislación española a esa Directiva.

HCR: (Hormigón Compactado con rodillo), es un tipo de homrigón sencillo de producir y colocar, ya que no requiere el empleo de equipos de construcción específicos, lo que conlleva a una economía considerable. Normalmente tiene un bajo contenido de cemento y el contenido del agua es escogido de tal forma que se produzca un hormigón que pueda ser compactable con rodillo.

HDPE: (Polietileno de alta densidad), es un polímero de cadena lineal no ramificada. Se obtiene por polimerización del etileno a presiones relativamente bajas (1-200 atm), con catalizador alquilmetálico (catálisis de Ziegler) o un óxido metálico sobre sílice o alúmina (procesos Phillips y Standard Oil). Su resistencia química y térmica, así como su opacidad, impermeabilidad y dureza son superiores a las del polietileno de baja densidad. Se emplea en la construcción y también para fabricar prótesis, envases, bombonas para gases y contenedores de agua y combustible.

Hectárea: Medida de superficie equivalente a 10.000 m^2.

Heliófilas: Plantas que crecen bien en condiciones de iluminación intensa, como la jaras (Cistus). El matorral heliófilo de jaras suele colonizar como pionero los terrenos que han perdido la cubierta vegetal por incendio, iniciando así las primeras etapas de la sucesión ecológica.

Heliofobo: Planta que crece mejor en lugares sombríos.

Heliógrafo: Instrumento meteorológico utilizado para registrar la insolación.

Helióstato: Sistema que comprende un dispositivo absorbente o reflectante. Orientable de forma tal que la radiación directa incidente es absorbida o reflejada en un punto fijo independientemente de la posición de la Tierra, durante las horas de luz diurna.

Helmito: Animal, semejante a un gusano, de interés para comprobar la calidad del agua

Hematites roja: También conocido como oligisto. Es de óxido férrico (Fe_2O_3) y constituye una importante fuente de hierro ya que en estado puro contiene el 70% de este metal. Es un mineral brillante de color negro a rojo negruzco o rojo ladrillo.

Hemiterpeno: (C_5H_8). Emisión gaseosa a la atmósfera de origen natural; vegetación (árboles, coníferas, plantas, etc.). Vida estimada de 4 a 8 días.

Hemoglobina: Pigmento que transporta oxígeno en la sangre de los vertebrados y algún invertebrado.

Henry, constante: Parámetro muy usado en la biorremediación para valorar la volatilización de compuestos orgánicos. Se mide en *atm* m^3*/mol*.

Heptacloro: Insecticida clorado. Se descompone en el suelo en heptacloroepóxido, que es una sustancia más estable y peligrosa que el heptaclor original. No se han dictado directivas europeas sobre este compuesto por ser el mismo de escasa utilización en el territorio comunitario; en el Reino Unido su empleo no está permitido.

Herbicida: Pesticida químico designado para controlar o destruir los órganos vegetales de las plantas, especialmente un destructor de hierbas selectivo. Generalmente se trata de preparados compuestos de una tifohormona y una o varias sustancias tóxicas.

Herbicidas de translocación: Herbicidas que pasan a través de toda la planta, desde las raíces a las hojas (por ejemplo, 2, 4, 5-T; 2, 4-D, dicloroprop; dalapón, MCPA, mecoprop, barbán; asulam; linurón).

Herbosa: Vegetación formada por plantas no leñosas.

Hertz (Hz): Unidad de frecuencia del sistema internacional, igual a un ciclo por segundo.

Heterocíclicos: Compuestos orgánicos (hidrocarburos) de cadena cerrada en cuyo anillo hay algún elemento distinto al carbono.

Heterosfera: Capa atmosférica donde la composición química es variable y depende del equilibrio difusivo, observándose una estratificación de sus componentes en función de su peso molecular (H, He, O, O_2, etc.).

Heteróstrofos: Incapaz de obtener alimento partiendo de principios simples y que, por lo tanto, depende para su alimentación de organismos muertos o vivos o otras especies, y, en último caso, de la planta verde. *Hevea* (*Euphorbiaceae*) *Hervea Brasiliensis* es la fuente de caucho más común. La especie procedente de Brasil fue introducida en Extremo Oriente a finales del siglo XIX.

Hexabromobifenilo: Compuesto organobromado usado como retardante de llama. Próximamente está previsto incluirlo en el Convenio de Estocolmo, como sustancia tóxica a eliminar.

Hexaclorobutadieno: Sustancia peligrosa recogida en la lista I de la Directiva 76/464, y cuyos valores límite de las normas de emisión aparecen en la Directiva 86/280 (y modificación 88/347), a cumplimentar a partir de 1-1-1990.

Hexaclorociclohexano: Compuesto organoclorado que se obtiene por cloración del benceno. Tiene propiedades insecticidas y es tóxico para las personas. Fórmula $C_6H_6Cl_6$.

HFC: (Hidrofluocarburos). Los hidrofluocarburos o hidrofluocarbonados son una familia de compuestos químicos que contienen átomos de hidrógeno, de fluor y de carbono. Los gases químicos de esta familia (de ellos los hidrofluorocarburos, el hexafluoruro de azufre y los perfluorocarburos o perfluocarbonados) son utilizados por su propiedad refrigerante y actúan como agente propulsor en los aerosoles y como disolventes. Los HFC, como por ejemplo el R134a, el R407C o el R410A, no contienen cloro en su composición por lo que son inocuos con la capa de ozono y se emplean ya como refrigerantes sustitutos de los CFC y los HCFC.

Hibernación: Letargo invernal de los animales. Los animales que hibernan experimentan un descenso de su metabolismo y de su temperatura corporal, incluso aquellos que son homeotermos. Los vertebrados que hibernan son frecuentemente especies de anfibios y reptiles, pero también existe hibernación en algunas especies de mamíferos.

Hidracida maleica: Regulador del crecimiento que se usa en el control de hierbas en áreas de paseo y ornamentación. Penetra en las plantas, mayoritariamente a través de las hojas, inhibiendo el crecimiento al evitar la división celular; tiene muy poca toxicidad para los mamíferos.

Hidracina: Líquido aceitoso (N_2H) que hierve a 113 ℃. Cuerpo muy inestable, venenoso y de olor semejante al amoníaco. Es usado como combustible para misiles.

Hidrargirismo: Enfermedad causada por la inhalación de compuestos de mercurio.

Hidratos: Hidratos de carbono. Familia de compuestos orgánicos «carbono hidratado» que compone la familia de los azúcares: desde los monosacáridos hasta los polisacáridos.

Hidratos de metano: Estructuras, descubiertas recientemente, heladas que se encuentran en el fondo de los océanos formadas por moléculas de hidrocarburos (básicamente metano). Se calcula que su potencial energético es el doble que la suma de todos los combustibles fósiles conocidos.

Hidraulicidad: Propiedad de una cal, cemento o mortero, que le permite fraguar debajo del agua o en situaciones

en las cuales no es posible el acceso al aire. // Relación existente entre las aportaciones hídricas dentro de un periodo observado, y las aportaciones medias correspondientes a un mismo periodo a lo largo de una serie de años (año medio).

Hidroarsenismo: También conocido como Hidroarsenicismo Crónico Regional Endémico (HACRE), es considerado un síndrome toxidérmico adquirido, causado por la ingestión prolongada de aguas con alto contenido de arsénico en personas susceptibles. Esta patología regional genera un problema sanitario particularmente grave en lugares donde el abastecimiento de agua depende mayoritariamente de pozos, cuyo análisis sistemático muchas veces queda fuera del alcance de los Organismos controladores.

Hidrocarburos (HC): Término general para los compuestos orgánicos que contienen solamente carbono e hidrógeno en su molécula. Son los cuerpos originarios de todas las combinaciones orgánicas. Los miembros inferiores son gases combustibles inodoros, los medios generalmente líquidos y los superiores sólidos. Algunos hidrocarburos de estructura complicada construyen un problema para la salud ya que son materias biológicamente no degradables o sustancias cancerígenas (por ejemplo, benzopireno). Ejemplos de productos compuestos de hidrocarburos son el crudo del petróleo y el gas natural. Resolución de 26 de Junio de 1978 del Consejo por el que se adopta el Programa de Acción de las Comunidades Europeas en materia de control y de reducción de contaminantes causada por el vertido de hidrocarburos en el mar. Decisión 80/686 crea un comité ejecutivo en materia de control y de reducción de contaminación causada por el vertido de hidrocarburos en el mar modificada por las Decisiones 85/218, 87/144 y 88/346

Hidrocarburos aromáticos: Compuestos orgánicos de cadenas media o larga en cuyas moléculas únicamente hay carbono e hidrógeno. Las fuentes son emisiones de combustión de vehículos, evaporaciones, pinturas, petróleos y disolventes. Tienen propiedades tóxicas y anestésicas. Los hidrocarburos aromáticos policíclicos son cancerígenos, y entre ellos se incluye el benzopireno y el dibenzopireno. Se llaman aromáticos porque tienen un olor característico.

Hidrocarburos clorados: Pesticidas persistentes de amplio espectro que son difíciles de eliminar del medio ambiente y que se acumulan en la cadena de alimentos. En la molécula de partida uno o varios átomos de hidrógeno han sido sustituidos por cloruro. Entre ellos se encuentra el DDT, el aldrín y el TCE (disolvente industrial).

Hidrocarburos heterocíclico: es el nombre que reciben aquellos hidrocarburos cuando contienen en su anillo al menos un átomo diferente al carbono y el átomo diferente se denomina heteroátomo. Los elementos que se presentan con mayor frecuencia son el azufre, oxígeno y nitrógeno.

Hidrocarburos naturales: Serie de compuestos de hidrógeno y carbono formados por descomposición de los restos de plantas y animales, que comprende los diversos tipos de carbones, aceites minerales, petróleo, parafina, resinas fósiles y betunes sólidos que se presentan en las rocas.

Hidrociclón: Equipo usado para clasificación, en el cual el material fluye dentro de un ciclón (contenedor cuya parte inferior termina en forma de cono) bajo aceleración provocada por la presión hidrostática, a través de un conducto - inyector tangencial. Dentro del ciclón, la mezcla fluida circulante es dividida en dos corrientes: una exterior que se hunde y una central que asciende,

Hidrocultivos: Cultivo de ciertas plantas cuyas raíces se encuentran exclusivamente en una solución nutritiva y no en la tierra. Este tipo de cultivo tiene por finalidad establecer qué sales nutritivas y qué oligoelementos necesita la planta, cultivar de forma cómoda plantas ornamentales y producir legumbres a gran escala.

Hidrófilo: Amante del agua o que se disuelve en ella./ Es el comportamiento de toda molécula que tiene afinidad por el agua. En una solución o coloide, las partículas hidrófilas tienden a acercarse y mantener contacto con el agua.

Hidrofobia: Que repele el agua. Véase hidrófobo.

Hidrófobo: Enemigo del agua o que no se disuelve en ella.

Hidrogenación: Tratamiento consistente en calentar un compuesto orgánico a cierta presión y en presencia de hidrógeno. Se usa como técnica de tratamiento de residuos ya que las formas hidrogenadas son menos agresivas que las originales.

Hidrógeno: Símbolo H. El elemento gaseoso más ligero. Se usa en la síntesis de muchos compuestos y sus isótopos se convierten en helio produciéndose una gran cantidad de calor y emitiendo radiaciones en la reacción termonuclear (bomba de hidrógeno). Es inflamable.

Hidrogeología: Parte de la geología que se ocupa del estudio de las aguas dulces y en particular de las subterráneas y de su aprovechamiento.

Hidrograma: Representación gráfica de la descarga de un cauce de agua frente al tiempo.

Hidrólisis: Descomposición de sustancias químicas por reacción con el agua.

Hidrólisis enzimática: Ruptura en dos de la molécula de agua por acción de enzimas.

Hidrólisis térmica: ruptura de enlaces por acción del agua en presencia de temperaturas elevadas.

Hidrología: Estudio del agua (y hielo) incluídas la lluvia, la nieve y el agua sobre y bajo la superficie de la tierra; abarca sus propiedades, distribución, utilización, etc.

Hidropulpado: Es el proceso básico que se usa para separar las fibras de papel con las que se produce pasta, que a su vez se transforma en papel y cartón.

Hidropulper: Equipo utilizado en el proceso de hidropulpado en la fabricación y reciclaje de papel.

Hidrosfera: Conjunto de capas líquidas que forman parte de la superficie terrestre. Comprende océanos, mares, aguas continentales, nieve y hielo.

Hidrosiembra: Siembra por aspersión de una mezcla de agua, semillas, fibras de origen vegetal, estabilizadores, condicionadores, abonos, etc.

Hidroxiapatito: Es uno de los componentes principales de los huesos junto al calcio. Su fórmula química es $Ca_5(PO_4)_3OH$.

Hidróxido de calcio: Cal apagada. Puede generarse por la acción del agua sobre el óxido de calcio (cal viva). Se usa en la purificación del azúcar, estabilización de fangos y en la elaboración de argamasas y yeso. También se usa en agricultura como sustitutivo de la cal pura para subir el pH del suelo.

Hidroxilación: Incorporación de un átomo de oxígeno molecular en el sustrato; el segundo oxígeno forma agua.

Hidruro: Compuesto capaz de formar enlaces (débiles) con el hidrógeno. Sistema de almacenar energía para luego poder liberar el hidrógeno.

Hierba elefante: (*Miscanthus sinensis*), planta de elevada producción (30-35 t/ha y año de materia seca) para la industria papelera, se deslignifica bien con etanol/sosa.

Higrófito: Planta que se encuentra en medios húmedos y que es muy sensible a la desecación.

Higrómetro: Instrumento meteorológico utilizado para medir la humedad relativa.

Higroscópico: La denominación higroscópico se deriva del griego higros y scopien (= atraer agua) y se refiere a todos los compuestos que atraen agua en forma de vapor o de líquido de su ambiente. Por esto los compuestos higroscópicos a menudo son utilizados como desecantes. Algunos de los compuestos higroscópicos reaccionan químicamente con el agua como los hidruros o los metales alcalinos. Otros lo atrapan como agua de hidratación en su estructura cristalina como es el caso del sulfato sódico. El agua también puede absorberse físicamente.

Hilado: Transformar una fibra textil en un hilo continuo cohesionado y manejable.

Hipocausto: Entre los griegos y romanos, habitación que se caldeaba por medio de hornillo situado debajo del pavimento.

Hipocentro: Foco de un terremoto. Lugar donde se produce la liberación de energía que da lugar al terremoto. Idealmente el foco suele considerarse como un punto situado a cierta profundidad, pero realmente puede estar situado en una falla, por lo cual se trata de un foco no puntual o extenso. Los hipocentros de los terremotos pueden ser superficiales o profundos. La máxima profundidad registrada es de unos 700 km.

Hipoclorito sódico: O *hipoclorito sódico*, (conocido popularmente como lejía, agua lavandina o agua de Javel) es un compuesto químico cuya fórmula es NaClO. Es un oxidante fuerte y económico. Debido a esta característica destruye muchos colorantes por lo que se utiliza como blanqueante. Además se aprovechan sus propiedades desinfectantes. En disolución acuosa sólo es estable a pH básico. Al acidular en presencia de cloruro libera cloro elemental. Por esto debe almacenarse alejado de cualquier ácido.

Hipolimnion: Capa de agua fría, sin circulación, en un lago, y que se encuentra situada bajo la termiclina.

HISPALYT: (Asociación Española de Fabricantes de Ladrillos y Tejas de Arcilla Cocida). Fundada en 1968 por un reducido número de fabricantes que vio la necesidad de unir esfuerzos para defender los intereses comunes del sector. Hoy en día, HISPALYT aglutina a cerca de 225 fabricantes y unos 40 socios adheridos (proveedores de maquinaria y equipos, materias primas, ensayos de laboratorio, asesoramiento técnico, consultoría, etc.). A partir de 1985 con la creación de las Secciones (agrupaciones de fabricantes por familias de productos), se ha potenciado la actividad técnica y promocional de HISPALYT, constituyendo el auténtico motor de la evolución de la Asociación.

Hístico: Aplícase a las capas superficiales del suelo que tienen bajo contenido en carbono orgánico y que pueden estar estacionalmente saturadas de agua.

Histograma: Representación gráfica de la textura o ligamiento de un tejido.

Histosol: Se llaman así los suelos con alto contenido en materia orgánica, de gran espesor, propios de zonas pantanosas.

Histosoles: Suelos orgánicos ampliamente desarrollados por la acumulación de materia orgánica. No hay ningún tipo de distinción climática, y en el término se incluyen otros suelos (pantanosos, etc.).

HMA: (*Hot mix asphalt*). E un tipo de cemento producido a base de cementos usados, mezclados con asfalto en caliente y con otros aditivos.

Hogar presurizado: Hogares donde el combustible se quema con un quemador que controla la cantidad de aire necesario para ello. Tienen mucho mejor rendimiento energético que los atmosféricos.

Hogar: Se conoce como hogar el lugar donde se produce la combustión, ya se trate de chimeneas, fogones, calderas, etc.

Hojalata: Recubrimiento, en caliente, de estaño en las láminas de acero. La capa de estaño suele tener menos de 0,025 mm de espesor.

Hollejo: Residuo de la uva una vez prensada, que está constituido por la piel.

Hollín: Partículas sólidas de tamaño muy pequeño y generalmente de colores oscuros resultantes de la combustión incompleta de un material (madera, carbón, etc).

Hollín ácido: Tizne ácido. Partículas de carbón que se mantienen unidas por efecto del agua en estado ácido por su combinación con el trióxido de azufre. Las partículas de carbón proceden de la combustión, y tienen de 1 a 3 μm de diámetro. En las instalaciones donde se queman aceites pesados y con chimeneas metálicas, este hollín puede formar sulfato de hierro que causa una coloración marrón y efecto indeseables sobre los materiales y la pintura. La emisión de hollín ácido puede reducirse con el uso de combustibles con un bajo contenido en azufre, disminuyendo el flujo de aire para minimizar la formación de trióxido de azufre, construyendo calderas inaccesibles al aire, aislando las chimeneas, aumentando la temperatura.

Holoceno: Medio ambiente considerado globalmente, formado por el bioceno y el abioceno.

Homosfera: Capa atmosférica con una composición química constante. Gracias a la agitación térmica, los componentes gaseosos están bien mezclados.

Hongos: Conjunto de organismos unicelulares o pluricelulares, con el cuerpo constituido por hifas que forman un micelio, sin clorofila, de vida saprófita, parásita o simbiótica, que normalmente viven en el suelo o en el agua.

Horizontes del suelo: Distintas y sucesivas capas que forman el suelo, generadas por procesos de distribución interna y no por deposición sedimentaria secuencial. Por convenio, el suelo se divide en los horizontes A, B y C. El horizonte A es el superior y contienen el humus que no tiene minerales, pues han lixiviado o/y eluviado. El horizonte B forma una zona de deposición y se ve enriquecido por los minerales arcillosos y óxidos de hierro a aluminio procedente del horizonte A. El horizonte C lo forma la roca madre y puede estar formado por roca parcialmente erosionada por los fenómenos atmosféricos, por materiales de transporte glacial o aluvial del suelo primitivo. En ocasiones se encuentra un horizonte D que está formado por la capa de roca masiva bajo las capas de suelo, y un horizonte O formado por la materia orgánica sobre el suelo. Estos horizontes pueden subdividirse, y también existe una nomenclatura lateral más detallada para referirse a las subcapas.

Hormigón celular: Se elabora a partir de 4 materias primas: arena, cal, cemento y yeso; estos 4 elementos se mezclan, agregándoles agua y un agente expansor a base de aluminio, que determina la expansión de la masa por la formación de millones de burbujas de aire uniformemente distribuidas en la mezcla.

Hormigonar: Rellenar con hormigón.

Hormonas: Producto de la secreción de ciertos órganos del cuerpo de animales y plantas que transportado por la sangre y por los jugos del vegetal excita, inhibe o regula la actividad de otros órganos o sistemas de órganos.

Horno continuo de incineradora: Horno de gran capacidad que funciona con alimentación continua de RSU, así como la continua extracción de cenizas y escorias.

Horno discontinuo de incineradora: Horno de pequeña capacidad cuyo funcionamiento debe interrumpirse cuando la acumulación de escorias reduce el volumen de la cámara de combustión y es necesaria su extracción.

Horno rotatorio de incineradora: Horno donde el residuo es volteado y avanza en el interior de un cilindro según se quema. Se utiliza especialmente en la incineración de residuos industriales.

Horno solar: Horno a gran temperatura obtenida mediante la concentración de los rayos solares sobre el material sometido a tratamiento térmico.

Hule: Material flexible y resistente fabricado a partir del látex. Los hay naturales y artificiales, vulcanizables o no.

Hulla: Nombre genérico de las rocas carbonosas duras y frágiles; carbón derivado de restos vegetales, pero alterado especialmente en lo que respecta a los constituyentes volátiles. Carbón piedra y carbón mineral que se conglutina, al arder y, calcinado en vasos cerrados, da coque.

Hulla bituminosa: Mineral de origen fósil que contiene entre un 75 y un 90% de carbono. Se origina por compresión del lignito. Es dura y quebradiza, de color negro y brillo mate o graso, estratificado y muy frágil. Hay dos variedades: La hulla grasa, al destilarla se obtiene gas de alumbrado y hulla magra o seca, ésta se emplea como combustible.

Humedal: Terreno saturado de agua.

Humedales: Grupo heterogéneo de sistemas acuáticos continentales de aguas someras y superficie grande en relación al volumen de agua que contienen. En los humedales la interacción de la columna de agua con el sedimento es muy intensa, y no se desarrolla la división de la columna (epilimnion e hipolimnion) como en los lagos. En general los humedales son muy productivos y la vegetación cobra una importancia relativa mayor que en los lagos. Los grupos de animales mejor representados son los invertebrados, no así los mamíferos.

Húmico: De características similares al humus.

Humícola: Que crece en tierra vegetal o en humus.

Humina: Sustancia húmica no soluble procedente de la descomposición del humus.

Humo: Sólidos que se encuentran en suspensión en el aire y que se originan por condensación de vapores y arrastre de partículas sólidas; también pueden formarse por sublimación y otras reacciones químicas. Las partículas tienen menos de un micrómetro de diámetro

y suelen ser de naturaleza metálica y óxidos metálicos que pueden ser tóxicos. // Aerosol formado por partículas diminutas, tanto sólidas como líquidas, de un diámetro inferior a una micra y que se forman por la combustión incompleta de cualquier producto combustible. En la contaminación del aire su presencia suele indicar procesos de combustión de combustibles sólidos.

Humos de combustión: Los productos gaseosos de la combustión en el hogar de una caldera, que consisten principalmente en CO_2, CO, O_2, N_2 y vapor de agua, y cuyo análisis se emplea para comprobar el rendimiento del hogar. También llamados gases de combustión.

Humus: Materia orgánica descompuesta presente en el estiércol. Es el producto final del compostaje y se utiliza para aportar a las plantas nutrientes necesarios para el crecimiento; mejora la textura del suelo y retiene el agua, evitando la lixiviación de los nutrientes. Es coloidal y de color pardo oscuro, y tan descompuesta que ha perdido todo signo de su estructura original.

Humus bruto: Humus con hojarasca o fibroso creado en condiciones de aerobiosis y formado en un medio biológicamente poco activo y ácido, en una vegetación resinosa y sobre rocas silíceas.

HUNOSA: (Hulleras del Norte, S.A.). Empresa española dedicada a la explotación y comercialización de yacimientos de hulla subterráneos de las cuencas del Nalón y Caudal, y a la explotación, en régimen de autogeneradora, de una central termoeléctrica de lecho fluidizado circulante.

IARC: (International Agency for Research on Cancer). Es el Instituto para la Investigación del Cáncer. Forma parte de la Organización Mundial de la salud. Su misión es coordinar y conducir investigación sobre las causas del cancer humano, los mecanismos cancerígenos y desarrollar estrategias científicas para el control del cáncer.

Ibuprofeno: Antiinflamatorio no esteroideo (AINE), utilizado frecuentemente para el alivio sintomático del dolor de, por ejemplo: cabeza (cefalea), dolor dental, dolor muscular (mialgia), molestias de la menstruación (dismenorrea), síndrome febril, y dolor tras cirugía (postquirúrgico). También se usa para tratar cuadros inflamatorios, como los que se presentan en artritis, artritis reumatoide (AR) y artritis gotosa.

ICC: (International Chamber of Commerce). Organización internacional de emprendedores con 7.500 miembros en un centenar de países. Por su parte 170 de los 7.500 miembros son asociaciones de empresarios. En 1971 se hizo público por primera vez en el campo ambiental con un congreso realizado en Viena, desde entonces es muy activa en este sector. Organiza las conferencias Wicem. En 1991 ha lanzado la «*Business Charter for Sustainable Development*». Tiene sede en París.

Ictiología: Ciencia que estudia los peces. Diferentes ramas de la ictiología son la sistemática y taxonomía de peces, la anatomía, la fisiología, la genética, el estudio de dinámica de pesquerías (ictiología aplicada), etc.

IDAE: Instituto para la Diversificación y el Ahorro de Energía. Organismo dependiente del Ministerio de Industria (España).

Identación: Proceso de aplicar una carga sobre el vidriado y valorar la penetración. Su medida se expresa por la relación carga/superficie y da una idea del grado de cohesión reticular (rigidez) de la estructura.

IG: Índice de gravedad, es una unidad de medida de gravedad de los incidentes laborales, normalmente se expresa en jornadas de trabajo perdidas por incidentes laborales, por cada millón de horas trabajadas. Corresponde al inglés SR (Severty Rate).

IGCC: (Integrated Gasification Combined Cycles). Central de Ciclo Combinado con Gasificación Integrada. Método muy eficiente de generación de electricidad comparado con otras tecnologías convencionales. La producción de electricidad y de aceites líquidos suelen usar esta tecnología, con la posibilidad de producir metano e hidrógeno para pilas de combustible.

Iglú: Contenedor de vidrio.

Ignición: Acción y efecto de encender un cuerpo si es combustible.

Ignífugo: Capacidad de algunos materiales de proteger contra el fuego.

Illita: Mineral del grupo de las micas, no-expandible, dioctaédrica, aluminosa y potásica que se presenta en la fracción de tamaño arcilla (menos de 4 micras). Los sistemas en los que este mineral aparece pueden ser ambientes de alteración, ambientes sedimentarios, ambientes diagenéticos/metamórficos y ambientes hidrotermales.

Iluvión: Deposición y precipitación de material lixiviado y/o eluviado.

Imbibición: Acción de empaparse de agua un terreno. El agua de imbibición es la contenida en un terreno cuando los poros de éste están llenos. // La adsorción o absorción de un líquido por un sólido o un gel, acompañada de hinchazón de este último.

Impacto ambiental; declaración, evaluación: El conjunto de alteraciones que se producen en el ecosistema como consecuencia de una instalación industrial y otro tipo de actuaciones que afecten el medio ambiente. Incidencia de una actuación de una área concreta y generalmente susceptible de medición. En España, RD legislativo 1302/1986 de evaluación de impacto ambiental, aprobado por el DE 1131/1988.

Impacto ecológico: Efecto que una actividad natural o realizada por el hombre tiene sobre organismos y su hábitat.

Impermeabilizante: Producto que confiere a otro la calidad de ser impermeable.

Implotar: Transformación brusca de cambio de fase cuando el vapor regresa al estado líquido de manera súbita, «aplastándose» bruscamente las burbujas y produciendo una estela de gas.

Impregnadores: Sustancias que al ser disueltas en líquidos disminuyen la tensión superficial de éstos y provocan que puedan penetrar fácilmente en el interior del cuerpo sólido. Se utilizan como medios de protección contra las llamas, contra bacterias y como medios de lavado.

Imprimación: Incorporar a la madera sustancias químicas para controlar el alimento a los agentes biológicos y/o degradantes prolongando la vida del material.

Impropios: Son todos aquellos materiales que no corresponden a la clasificación y selección efectuada en una determinada fracción de residuos.

Impurezas: Cualquier tipo de compuesto o mezcla extraña a un material. Son causa de contaminación.

Inceptisoles: Suelos jóvenes con horizontes, débilmente desarrollados. Se encuentran en climas variables, incluyéndose en este grupo las tierras pardas y los suelos de tundra.

Incineración: Tratamiento térmico de eliminación de residuos consistente en oxidarlos a altas temperaturas mediante un proceso controlado. Persigue la combustión completa de sus componentes combustibles y fermentables dejando como residuo la fracción inerte.

Incineradora, Instalación: Horno preparado para la quema de residuos bajo condiciones controladas. Las Directivas comunitarias 89/369 y 89/429 hacen referencia a la prevención/reducción de la contaminación atmosférica procedente de nuevas/existentes instalaciones de incineración de residuos municipales.

Indicador de pH: Instrumento que mide la concentración de iones hidronio en una solución. En una escala de pH de 0 a 14, el 7 indica una solución neutra; si es inferior es ácida y superior alcalina. Véase *pH, valor*.

Indicador de presencia: Especies cuya presencia indica la existencia de un factor ambiental particular (por ejemplo la existencia de un cierto número de coliformes en una muestra de agua indica la existencia de contaminación fecal en el agua).

Indicador radiológico: Indicador que señala la presencia de radioactividad por encima de un determinado valor.

Indicadores biológicos: Son especies vegetales o animales utilizadas para medir la contaminación basándose en la evaluación del número y distribución de individuos y especies, antes y después de un cambio en el medio ambiente.

Indicadores de suelo: Plantas que por el hecho de brotar principal o exclusivamente en determinados suelos, revelan las propiedades de éstos.

Indicadores ecológicos: Organismos cuya presencia específica en una área indica la existencia de una serie particular de condiciones en el suelo y en el agua, temperatura, zonas, etc. Las especies grandes con requerimientos relativamente específicos son de gran utilidad en este aspecto. La relación numérica entre especies, poblaciones o comunidades completas son más fiables que una especie sola.

Índice biótico: Ratio utilizado para la clasificación de los caudales de agua dulce de acuerdo con el tipo de comunidad de invertebrados presente en el agua. Es una indicación de la contaminación orgánica existente ya que mide la cantidad de O_2 disuelto presente. A medida que la contaminación aumenta el oxígeno disminuye, desapareciendo las especies más sensibles, y el índice biótico es bajo. Presentan un índice biótico alto las aguas con gran variedad de especies, algunas incluso sensibles a la falta de oxígeno; son aguas limpias.

Índice de cetano: Número en una escala convencional, que indica la aptitud de un carburante para motor diesel, de inflamarse en condiciones normalizadas. Se expresa por el porcentaje en volumen de cetano (hexadecano) en una mezcla de referencia que presente el mismo plazo de inflamación que el carburante sometido a prueba. El índice de cetano es tanto más elevado cuanto más corto sea el índice de inflamación.

Índice de contaminación: Coeficiente numérico que representa la desviación de la contaminación medida en relación con la concentración de contraste.

Índice de ruido: Valor en decibelios indicador del grado medio de sonido que se registra en un lugar.

Índice de yodo: Cantidad de yodo absorbida por gramo de grasa, aceite o carbón. Constituye una medida del grado de instauración.

Índigo: Pigmento colorante azul muy intenso. Químicamente deriva del índol, sustancia muy tóxica formada a partir de la putrefacción de las proteínas por la acción de ciertas bacterias sobre el triptófano.

INE: (Instituto Nacional de Estadísticas o Estadística). es un nombre usado en España, Portugal y Latinoamérica, para designar los organismos oficiales encargados de recopilar las estadísticas demográficas, sociales y económicas. Así como planificar, levantar y analizar los censos. Una de sus principales actividades es desarrollar los índices de precios para los estudios macroeconómicos. Entre ellos tiene gran importancia el IPC.

Inercia térmica: Propiedad que indica la cantidad de calor que puede conservar un cuerpo y la velocidad con que la cede o absorbe del entorno. Depende de la masa, del calor específico de los materiales y del coeficiente de transmisión térmica de éstos. Esta propiedad se utiliza en construcción para conservar la temperatura del interior de los locales habitables más estable a lo largo del día. Durante el día se calientan, y por la noche, más fría, van cediendo el calor al ambiente del local. En verano, durante el día, absorben el calor del aire de ventilación y por la noche se vuelven

a enfríar con una ventilación adecuada, para prepararlos para el día siguiente.

Inertización: Operación destinada a reducir la carga tóxica de un residuo. Tratamiento fisicoquímico, químico o térmico de acondicionamiento de un residuo consistente en mezclarlo con reactivos específicos con la finalidad de obtener un residuo apto para admitirlo en un vertedero controlado.

Infiltración: Cantidad de agua subterránea que penetra en una tubería a través de sus junturas, los poros de las paredes o de las roturas que pueda tener.

Ingeniería ambiental: Ingeniería que se ocupa de prevenir, controlar o disminuir el riesgo que las emisiones contaminantes de instalaciones y actividades diversas comporten para el medio ambiente.

Ingeniería genética: Tecnología de la manipulación y transferencia del ADN de unos organismos a otros, que posibilita la creación de nuevas especies, la corrección de defectos genéticos y la fabricación de numerosos compuestos, OMG (Organismos Modificados Genéticamente).

Ingenios: Fábricas productoras de azúcar.

Inmisión: Medida de la cantidad de contaminantes en un área a mucha distancia de los focos emisores.

Inmisión, niveles de: En control de contaminación de aire, la concentración de contaminantes en una área definida y durante un periodo fijo de tiempo antes de cerrar o cortar las fuentes de emisión controladas. Véase *Normas de inmisión*.

Inoculantes: Mezcla de cultivos de bacterias especialmente concebidos para añadir al proceso de compostaje y/o digestión.

Insecticida: Pesticida específico para eliminar o controlar las plagas de insectos. Existen tres tipos principales: por ingestión, por contacto y por fumigantes. Muchos insecticidas combinan dos o más de estas funciones. // Clorados y organoclorados.

Insecticidas del ciclodieno: Subgrupo de insecticidas organoclorados en el que se incluye el clordano, aldrín, dieldrín y endrín.

Insolación: El total de radiación solar que llega al receptor del colector. Comprende las radiaciones difusa, directa y reflejada. Depende de la posición de la Tierra sobre su órbita, del espesor y transparencia de la atmósfera, de la inclinación de la superficie que intercepta los rayos solares y de la constante solar.

Insonorización: Conjunto de actuaciones que tienen por finalidad la reducción de un impacto sonoro.

Inspector medioambiental acreditado: Toda persona y organización que haya obtenido una acreditación en las condiciones y por los procedimientos establecidos en el artículo 7. DOCE 30.4.93. Reglamento auditoría.

Instalación *offsite*: Planta de tratamiento, lugar de almacenamiento o zona de depósito final de residuos peligrosos que se encuentra localizada lejos del lugar de generación.

Instalación *onsite*: Planta de tratamiento, lugar de almacenamiento o zona de depósito final de residuos peligrosos que se encuentra localizada en el lugar de generación de residuos.

Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja: Perteneciente al Consejo Superior de Investigaciones Científicas de España, es un centro de investigación y asistencia científico-técnica en el ámbito de la construcción.

Instituto de Conservación de la Naturaleza: (ICONA). Organismo público español, creado en 1971, para continuar los trabajos del desde entonces extinguido Patrimonio Forestal del Estado (PFE), incorporando en parte y de forma muy discutida las nuevas ideas sobre preservación del medio ambiente. Depende de la Dirección General de Montes, del Ministerio de Agricultura. El ICONA desarrolla su labor en las áreas de reforestación, administración de montes públicos, caza y pesca continental, reservas ecológicas (parques nacionales y otros espacios protegidos).

Instituto de Reforma y Desarrollo Agrario: (IRYDA). Organismo del Estado Español, creado en 1971, como resultado de la reagrupación del Instituto Nacional de Colonización y del Servicio Nacional de Concentración Parcelaria y Ordenación Rural ~~ad~~además de otras entidades menores ~~q~~que habían venido actuando en áreas muy próximas entre sí para la mejora técnica del medio rural. El IRYDA se ocupa básicamente de la concentración parcelaria, puesta en regadío, conservación de suelos y ordenación rural.

Instituto Nacional de Hidrocarburos: (INH). Creado en 1981, es el holding del Estado Español para el petróleo, el gas natural, los gases licuados del petróleo y la petroquímica.

Intensidad acústica: Energía que atraviesa la unidad de superficie perpendicular a la dirección de propagación de las ondas por unidad de tiempo.

Intercambiador iónico: Equipo que contiene resinas del intercambio iónico para modificar la concentración de las sales contenidas en las aguas.

Intercambiador o cambiador de calor: Dispositivo que transfiere el calor de una sustancia a otra, sin mezclarlas.

Intercambio iónico: Método de tratamiento de los metales contenidos en los afluentes industriales que consiste en una reacción reversible con los iones del intercambiador. Cuando éste está saturado se regenera y los iones metálicos pasan a la solución regenerante. Casi todos los metales pueden ser eliminados o recuperados por este procedimiento.

Internalizar: (relacionado con costes de daños ambientales). En términos neoclásicos, internalizar costes externos significa elevar los precios de los recursos para re-

ducir su consumo hasta llegar a un nuevo punto de equilibrio que se supone sostenible desde el punto de vista ambiental y óptimo desde el punto de vista económico.

Intrusión marina: En los acuíferos litorales, la proximidad al mar hace que aparezca a cierta profundidad una superficie de contacto o interfase entre el agua dulce y el agua marina. La explotación excesiva del acuífero de agua dulce puede modificar el equilibrio existente, desplazándose la superficie de interfase, lo que produce una salinización del acuífero por intrusión marina.

Inventario ambiental: Estudio del estado de un ámbito territorial y de sus condiciones ambientales antes de la realización de una obra o actividad, y también de las diferentes formas existentes de ocupación del suelo y de aprovechamiento de otros recursos naturales.

Invernadero, efecto: Véase *Efecto invernadero* o *Recalentamiento global*.

Inversión térmica: Aumento anómalo de la temperatura con la altura en la troposfera. Cerca del suelo, la inversión se acompaña frecuentemente de niebla. En altura indica el límite de masas de aire diferentes o el límite de la troposfera. Cuando el viento está en calma pueden acumularse polvo y gases en la atmósfera y producirse *smog*.

Invierno nuclear: Hipótesis configurada por simulación (a través del modelo TAPPS), conforme a la cual una guerra nuclear de gran envergadura ocasionaría drásticos cambios climatológicos, equivalentes a un drástico y severo invierno, que acabaría con la vida del planeta tal y como hoy la conocemos.

Inyección de agua: Técnica para reducir la formación y la emisión de contaminantes generados por los motores de combustión interna. Las investigaciones han demostrado que éste es el sistema más eficiente para reducir la emisión de contaminantes, pero requiere que los vehículos transporten depósitos de agua tan grandes como los del carburante. Por otra parte, el agua puede congelarse y los anticongelantes que se emplean para evitarlo dan lugar a productos contaminantes importantes. También se puede producir una corrosión a largo plazo en el motor.

Inyector: Aparato que introduce aire a presión dentro de una masa de agua para que se disuelva una parte.

Ion: Átomo, molécula o radical cargado eléctricamente cuya emigración efectúa un transporte de electricidad a través de un electrolito o a través de un gas.

Ionización: Efecto, que provoca interferencias y ruidos, provocado por los potentes campos eléctricos, generados, por ejemplo, por las líneas de alta tensión.

Ionosfera: La región por encima de la superficie de la Tierra en la cual tiene lugar la ionización, con variaciones diurnas y anuales, que están regularmente asociadas con la radiación ultravioleta del Sol, y variaciones esporádicas por las explosiones de hidrógeno de las manchas solares.

IPCC: Panel Intergubernamental de Cambio Climático.

IPPC: Ley sobre el control integrado de la contaminación.

Irradiación: Exposición a los rayos, especialmente a los rayos X o ultravioleta. // En el proceso de desinfección y potabilización del agua se utilizan radiaciones de luz solar por ser ésta un desinfectante natural; las radiaciones ultravioleta eliminan los microorganismos existentes en el agua y el color, especialmente el que se debe a causas naturales. Este proceso no puede aplicarse a grandes caudales de agua ya que el poder de penetración es limitado; el 30% de la radiación se pierde en profundidades superiores a cinco centímetros en las aguas limpias y en aguas de río a un centímetro aproximadamente. Por otra parte, se necesitan dosis mayores para tratar virus que las que precisan las bacterias. Véase *Ultravioleta*.

Irradiancia: Flujo de radiación solar que incide sobre la unidad de superficie por unidad de tiempo. Se trata de una densidad de potencia.

Irrigación: Aportación de agua a un terreno de cultivo por medio de canales, acequias, aspersión, etc.

Irritante: Sustancia o producto químico que produce irritación.

ISO: (International Organization of Standard). En realidad parece que el acrónimo ha sido reconstruido, en cuanto la elección de la denominación ISO a la etimología griega (pares, iguales). El ISO está entre las mayores y más influyentes organizaciones de normalización internacional. Particularmente célebres, y universalmente adoptados son sus estándares referentes a la calidad (ISO 9000).

ISO 14000: Serie de normas sobre auditorías y gestión ambiental.

Isóbaras: Zonas (delimitadas por líneas) de igual presión.

Isómero: Compuestos químicos que tienen la misma fórmula química pero diferente configuración en el espacio. Entre ellos se distinguen por los prefijos ISO y TRANS.

Isopaca: En un mapa geológico, son las líneas de igual espesor de un material en una formación.

Isopropanol: Denominación legal de la etiquieta para el alcohol isopropílico. También conocido como alcohol isopropílico**,** 2-propanol, propan-2-ol. Es un alcohol incoloro, muy miscible con el agua.// Kerosina de alta pureza utilizada para la elaboración de insecticidas.

Isótopo: Elemento que tiene el mismo número atómico pero diferente peso atómico debido a sus neutrones. Varios isótopos de un mismo elemento pueden tener diferentes comportamientos radioactivos. Pueden tener una larga vida como contaminantes de suelo y agua y pueden tener efectos mutágenos sobre el cuerpo humano.

Isoventas: Líneas de un mapa eólico que unen puntos de igual velocidad media de viento, debiendo ser especi-

ficadas previamente las condiciones de determinación de la velocidad media.

ITeC: (Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña). Fundación, sin ánimo de lucro, establecida el en año 1978, sujeta a la legislación de la Generalitat de Cataluña. Está ubicada físicamente en Barcelona. Ejerce su actividad en el ámbito de las acciones que tienen como perspectiva el progreso de la construcción.

I-TEQ: Antigua notación para designar el Equivalente Tóxico Internacional (I-TEQ), creada inicialmente por la Organización sobre el Tratado del Atlántico Norte (OTAN) en 1989 y posteriormente ampliada y puesta al día para medir el «mix» de dioxinas y furanos presentes en una muestra.

Jaboncillo: Variedad de talco (silicato magnésico hidratado).

Jabones: Compuestos de sales sódicas y potásicas de ácidos grasos de elevado peso molecular utilizados como medio de lavado. Los jabones son más fácilmente degradables que los detergentes y contaminan menos el medio. Los jabones blandos contienen sales de potasio, mientras que las sales de sodio constituyen los jabones duros. Las sales de resinas forman los jabones de resina.

Jatrofa: Arbusto tropical, oriundo de la India, capaz de transformarse en biodiesel.

Joule: Unidad internacional de calor: 1 J = 0,239 calorías. // Efecto Joule: calentamiento de los metales y conductores al ser atravesados por una corriente eléctrica.

Julio: Ver *Joule*.

Karst: Región de roca caliza o dolomítica y de otras rocas solubles (como el yeso y la sal) donde se ha producido el desarrollo de formas específicas causadas por los procesos de corrosión y de erosión superficial y subterránea (fisuras, cavernas, fosas, etc.), con un drenaje dominantemente subterráneo.

Kárstico: Los relieves kársticos aparecen en regiones calizas como resultado del ataque químico del agua con anhídrido carbónico disuelto a las calizas, que provoca su destrucción. El proceso kárstico presenta diferentes etapas en su evolución, que se corresponden con morfologías del paisaje diferentes.

Kenaf: Planta herbácea anual originaria de África, de la familia de las Malváceas, como el algodón, y puede alcanzar hasta 4 metros de altura durante el periodo de crecimiento, que comprende entre 150 y 180 días, con un rendimiento de entre 13 y 22 toneladas de materia seca por hectárea. Esta planta tiene dos tipos de fibra: la corteza, que representa el 30% del volumen de cosecha y un núcleo interno leñoso que supone el 70% restante de la producción. Cuando las dos fibras se reducen a pasta, la mezcla resulta excelente para la producción de papel, especialmente papel prensa.

Kepone: Insecticida clorado.

Keroseno: Producto obtenido en la primera destilación del petróleo. También se conoce con el nombre de petróleo lampante. Se utiliza como combustible en motores de poca compresión, en lámparas y estufas.

Kiesselghur (harina fósil o terras radiolarios): Se emplea para pulimentar metales no es sino una especie de tierra compuesta de esqueletos. El trípoli de diatomeas, también llamado «kiesselghur», se emplea como elemento filtrante y para la fabricación de aislantes, además tiene una aplicación menos inocente; se le usa en la fabricación de la dinamita.

Kilocaloría (Kcal): Unidad de energía igual a 1.000 calorías.

Kilovatio (kW): Unidad de potencia equivalente a 1.000 vatios.

Kilovatio hora: Unidad de trabajo o de energía, equivalente a la energía producida o consumida por una potencia de un kilovatio durante una hora. Equivale a 860 Kcal.

Kjeldahl, método: Análisis químico cuantitativo por el que se determina la cantidad de nitrógeno transformado previamente a amoníaco.

KPEG: Glicolato potásico de polietileno.

Kraft-Liner: Papel de cobertura esencialmente constituido de pasta nueva de resinosos, que puede comportar hasta un máximo de 20% de pasta reciclada de buena calidad y de fibras duras. // Papel parduzco fabricado con pulpa de madera al sulfato. Se utiliza como dieléctrico, para cintas engomadas, envoltorios, etc.

Kriptón 85: Isótopo radiactivo del elemento químico kriptón que es un gas noble. Símbolo Kr.

Lacas: Soporte para pinturas que contiene resinas, gomas o ésteres celulósicos, se disuelven o dispersan en un disolvente orgánico volátil. Las resinas son insolubles en agua por lo que una superficie «lacada» se hace impermeable al agua.

Lacunaje: Sistema de depuración en que las aguas son retenidas en lagunas.

Laguna de estabilización: Laguna donde llega el fango activado después de una corta estancia en las aguas residuales con el fin de someterlo a una oxidación antes de devolverlo a un nuevo contacto con las aguas residuales.

Lámpara de sodio: Luz usada en las vías públicas que emite una luz amarilla, consume menos energía que las luces ordinarias y que no atrae a los invertebrados voladores.

Lana de roca: Fibra mineral utilizada como un aislante térmico, usando como materia prima el basalto y otras rocas de origen volcánico.

Land Farming: Proceso de tratamiento de biorremediación que se lleva a cabo en la zona superior del suelo o en celda de biotratamiento. Los suelos contaminados, sedimentos o residuos son incorporados entre la superficie del suelo y periódicamente son volteados para airear la mezcla. Esta técnica ha sido muy exitosa en el manejo y disposición de desechos de diesel y otros residuos de refinería del petróleo.

Lapilli: Material volcánico constituido por fragmentos de lava irregulares y piroclastos de 2 a 30 mm o de 2 a 64 mm, según la clasificación granulométrica que se adopte.

LAS (Alquilobencenos Sulfonato Lineal): Lineal Alquilbenceno Sulfonato. Surfactante aniónico que se desarrolló como respuesta a los problemas de generación de espuma de los jabones normales. Posee un alto grado de biodegradabilidad (próximo al 100%), y de gran rapidez (solo 3-4 horas en planta depuradora). Además tienen compatibilidad y versatilidad con todo tipo de fórmulas e ingredientes. Se usa tanto en detergentes líquidos de todo tipo (para lavadoras, lavavajillas, etc.) como en detergentes sólidos (tabletas, detergentes en polvo tradicionales, etc.).

Lastre: Masa de agua que carga un buque para conseguir el equilibrio durante la navegación en vacío. En minería equivale a estéril.

Lata: Recipiente rígido elaborado con metal, acero o aluminio, que sirve para contener bebidas o conservas.

Latencia: Etapa en la cual los microorganismos se adaptan al medio.

Laterítico: Suelos donde la proporción de alúmina, respecto a la sílice, es elevada sin llegar a la proporción de la verdadera laterita.

Laterización: Degradación del suelo.

Látex: Solución de caucho usada algunas veces para aumentar la fuerza y duración del papel. Se emplean naturales o sintéticos para impregnación o mezclado con algún producto con el fin de producir una imitación de piel.

Latitud geográfica: La latitud de un punto de la superficie terrestre es el ángulo entre la vertical del punto y el ecuador. Se mide en grados sexagesimales y varía de 0º en el Ecuador a 90ºen los Polos. Las latitudes de los puntos de cada hemisferio se distinguen con la notación N o S (por ejemplo, 45ºN, 15ºS). La latitud y la longitud son las coordenadas geográficas.

Latón: Aleación de cobre y zinc.

Latosolización: Proceso de meteorización que afecta, principalmente, a los suelos tropicales en los que se forman suelos muy ricos en óxidos de hierro.

Lavado de gases: Sistema de depuración de gases por vía húmeda. Se hace pasar el gas a través de nebulizaciones de agua (o agua con aditivos) que actúan de filtro «adsorbente» para las partículas sólidas o bien reaccionan con ellas. El sistema está, básicamente, diseñado para neutralizar los gases ácidos presentes en la corriente de gases.

Lavado de nitrato: Lavado de los compuestos nitrogenados contenidos en el abono y acumulados en el humus. Estos son suavemente arrastrados, lo que provoca su acumulación en el agua del fondo.

LCA: *Life Cycle Analysis*. Se llaman así las técnicas de análisis de un producto para evaluar sus características de calidad desde el punto de vista medio ambiental, los impactos negativos en el medio ambiente producidos por tal producto, desde las fases de producción a las de transporte, empleo y eliminación.

LCD (Liquid Crystal Display): Siglas en inglés de Pantalla de Cristal Líquido, dispositivo inventado por Jack Janning, quien fue empleado de NCR. Se trata de un sistema eléctrico de presentación de datos (Display) formado por dos capas conductoras transparentes y en medio un material especial cristalino (cristal líquido) que tienen la capacidad de orientar la luz a su paso.

LD 0: Se refiere a la concentración y dosis máximas de un producto sin que resulte peligroso para los organismos.

LD 10: Concentración y dosis mínimas para que un producto tóxico resulte venenoso para los organismos.

LD 50/Dosis letal: Dosis de un producto tóxico que en un test biológico ha eliminado el 50% de los organismos en un determinado periodo de tiempo.

LDPE: (Polietileno de Baja Densidad). Polímero de cadena ramificada. Se obtiene por polimerización del etileno a altas presiones (aproximadamente 1.200 atm y 200 ºC) con oxígeno o catalizador de peróxido y por mecanismo de radicales libres. Es un sólido más o menos flexible, según el grosor, ligero y buen aislante eléctrico. Se trata de un material plástico que por sus características y bajo coste se utiliza mucho en envasado, revestimiento de cables y en la fabricación de tuberías.

Lechada: Generalmente, suspensión de hidróxido cálcico en agua utilizada como reactivo.

Lechada de cal: Ver *Cal*.

Lechos bacterianos: Filtro constituido por gravilla o ladrillo triturado, que se utiliza en la fase final o de oxidación del tratamiento de aguas residuales.

Leg.: Litro equivalente de gasolina, empleado para comprobar el contenido energético de las gasolinas.

Legionela: Bacteria que produce la enfermedad del legionario o legionelosis. Adquirió su denominación en 1976, cuando apareció un brote de neumonía entre los participantes de una convención de la Legión Americana en Filadelfia (EE UU). Durante 1977, los científicos identificaron una bacteria previamente desconocida, como la causa de la misteriosa infección de la enfermedad del legionario, bacteria que se denominó Legionela o *Legionella pneumophila*.

Legionelosis: Ver *legionela*.

Lejía: Compuesto químico denominado hipoclorito de sodio, disuelto en agua. Fue desarrollado por el francés Berthollet en 1787 para blanquear telas. Luego, a fines del siglo XIX, Luis Pasteur comprobó su incomparable poder de desinfección, extendiendo su uso a la defensa de la salud contra gérmenes y bacterias.

Lejía negra: Véase *Licores negros.*

Lepton: Ver *bosón.*

Leptospirosis: La Espiroqueta Leptospira Interrogans produce la enfermedad de Weil y es transmitida por la

orina de animales salvajes y domésticos, en especial ratas y perros. La infección, en el hombre se produce por contacto directo con la orina o los tejidos del animal infectado o por medio del agua y el suelo contaminados.

Letal: Que puede producir la muerte.

Levadura: Nombre genérico de ciertos hongos unicelulares, de forma ovoidea, que se reproducen por gemación o división. Suelen estar unidos entre sí en forma de cadena, y producen enzimas capaces de descomponer diversos cuerpos orgánicos, pricipalmente los azúcares.

Ley (de un mineral): Se refiere a la concentración de oro, plata, cobre, estaño, etc., presente en las rocas y en el material mineralizado de un yacimiento.// Riqueza del metal en un determinado mineral.

Ley IPPC: Corresponde a la Ley 16/12 de 1 de Julio, de Prevención y Control Integrados de la Contaminación *(Integrate Pollution Prevention and Control)*. Tiene por objeto evitar, o cuando ello no sea posible, reducir y controlar la contaminación de la atmósfera, del agua y del suelo, mediante el establecimiento de un sistema de prevención y control integrados de la contaminación, con el fin de alcanzar una elevada protección del medio ambiente.

Lias: Residuo líquido procedente de los procesos de vinificación.

LIC: Abreviatura muy utilizada para Lucha Integrada contra la Contaminación.

Licencia fiscal de actividades comerciales e industriales: Constituye un tributo local de carácter real cuyo hecho imponible es el ejercicio de las citadas actividades, estando exentas las actividades agrarias.

Licor de mezcla: Cultivo biológico formado por un elevado número de microorganismos agrupados en flóculos que se encuentra en el reactor biológico.

Licores negros o lejías negras: Residuo de las fábricas de pasta de papel. Está compuesto por una parte de mineral y otra orgánica formada mayoritariamente por lignina.

Licorella: Suelo desarrollado a partir de esquistos de poco espesor y pedregoso. El terreno es bueno para el cultivo del vino y la fabricación de cerámica.

Lignina: Es una celulosa compuesta principalmente por pentosanas y compuestos aromáticos. Complicada mezcla de sustancias formada por ciertas células de plantas y depositadas en paredes de células pertenecientes, particularmente a los tejidos leñosos. // La lignina es un grupo de compuestos químicos usados en las paredes celulares de las plantas para crear madera. Este componente de la madera realiza múltiples funciones que son esenciales para la vida de las plantas. Por ejemplo, posee un importante papel en el transporte interno de agua, nutrientes y metabolitos. Proporciona rigidez a la pared celular y actúa como puente de unión entre las células de la madera, creando un material que es notablemente resistente a los impactos, compresiones y flexiones.

Lignito: Combustible fósil rico en azufre de mediana calidad, de color negro o pardo. Se trata de un carbón mineral intermedio entre la turba y la hulla, con un gran contenido de humedad. Su poder calorífico oscila de 2.000 a 4.500 kilocalorías por kilogramo. Se emplea en calderas. // En geología, madera fósil compacta de color pardo apagado, que representa una fase en la conversión de los restos vegetales en hulla.

Límite de emisión: Nivel de emisión que, de acuerdo con la legislación, no se ha de superar en un foco emisior.

Límite de tolerancia: Máxima concentración de una materia perjudicial que puede soportarse en el aire que se respira durante un periodo de tiempo prolongado sin que pueda calificarse de nocivo para la salud. Este límite es muy discutible ya que los conocimientos actuales de medicina son limitados y es posible que no alcancen a definir con exactitud los efectos negativos en el medio.

Límite del bosque: Ecotono entre comunidades de bosque y de hierba o matorral, a menudo mantenido o aumentado por el hombre.

Limnímetro: Aparato utilizado para medir, sin registrar, la altura del nivel de agua de un pozo, un lago, un río, un vertedero, etc.

Limnología: Ciencia que estudia, en el sentido más amplio, las aguas continentales. Ciencia que estudia los lagos considerándolos como biotopos y todos los organismos que los pueblan (biocenosis).

Limo: Material suelto con una granulometría comprendida entre la arena fina y la arcilla. Es un sedimento clástico incoherente transportado en suspensión por los ríos y por el viento, que se deposita en el lecho de los cursos de agua o sobre los terrenos que han sido inundados. Para que se clasifique como tal, el diámetro de las partículas de limo varía de 0,002 mm a 0,06 mm.

Limonita: Nombre dado a ciertos minerales de hierro provenientes de alteración nutrida de los vegetales en aguas ferroginosas. Pueden considerarse como un hidrato de hierro. Son amorfos y de color pardo oscuro.

Limpieza de calles: Servicio que se realiza por los municipios para dejar libre de residuos y/u olores las calles y avenidas de un determinado lugar.

Linaza, aceite: Véase *Lino*.

Líndano: Isómero separado del hexaclorociclohexano (HCH). Insecticida organoclorado que se emplea en el control de las plagas de insectos, como son los áfidos, ácaros y gorgojos de los granos. Es nocivo para las abejas, peces, etc. y es muy persistente, aunque no tanto como el DDT. Algunos son fitotóxicos (véase *HCH*). Informes científicos, base de la Directiva 84/491, relativa a los vertidos de HCH, aluden a los efectos del lindano, sobre todo el sistema nervioso

central y en la generación de distintos tipos de cáncer. Esa directiva ordena las plantas de producción y extracción del lindano, y exige el control sobre cualquier vertido independiente de su fuente.

Línea básica de contaminación: Cantidad de contaminación que hoy día produce cada fuente. Es determinante para establecer los créditos de contaminación que pueden concederse en los países que esiste este sistema de regulación como es el caso de Estados Unidos.

Liner: Barrera impermeable que se utiliza para evitar el filtrado de los lixiviados de los vertederos fuera de la zona controlada. Los materiales utilizados son el plástico y la arcilla compacta. También se denomina con este nombre al recubrimiento especial que se hace en las canalizaciones de aguas residuales para evitar las filtraciones.

Lino: (nombre científico: *Linum Usitatissimum*) es una planta herbácea de la familia de las lináceas. Su tallo se utiliza para confeccionar tela y su semilla, llamada linaza, se utiliza para extraer harina (harina de linaza) y aceite (aceite de linaza). Su fruto seco recibe el nombre de ‘gárgola’.

Línters: Fibras de algodón muy cortas que quedan en la semilla y que se utilizan para obtener algodón hidrófilo, derivados de la celulosa y para fabricar papel.

Linuron: Herbicida del grupo de la urea que actúa en el suelo. Se usa para eliminar la caléndula y otras malas hierbas de las cosechas anuales. Puede ser irritante para los ojos y la piel y venenoso para los peces.

Liofilizar: Proceso de secar, deshidratar, completamente un material (por ejemplo, la leche en polvo).

Lípidos: Grasas.

Lipofílico: Que tiene una fuerte afinidad por las grasas y otros lípidos.

Liposoluble: Propiedad de algunas sustancias de disolverse en grasas o aceites

Liquen: Asociación simbiótica entre un hongo y un alga. Los líquenes suelen colonizar superficies de rocas o ser epifitos. Por su sensibilidad a la contaminación del aire pueden utilizarse como bioindicadores

Lisímetros: Reactores en los que se reproducen los procesos que tienen lugar en un vertedero controlado de RSU, lo cual permite estudiar el comportamiento de un vertedero como reactor químico de lecho fijo.

Lista negra: Clasificación que aparece en la directiva 76/464 relativa a la contaminación causada por determinadas sustancias peligrosas vertidas en el medio acuático de la Comunidad. La lista negra o lista I incluye las sustancias más peligrosos en función de su toxicidad, persistencia, y bioacumulación en el medio acuático ~~co~~mpuestos organohalogenados y organofosforados, sustancias carcinógenas y los compuestos de cadmio y mercurio. ~~L~~a Directiva 80/68 relativa a la protección de las aguas subterráneas también clasifica las sustancias peligrosas en dos listas I y II, pero no coinciden exactamente con las de la anterior directiva. Aquí la lista I añade orgánicos de estaño, aceites minerales, hidrocarburos y cianuros.

Lista roja: Lista de sustancias prioritarias que deben ser reguladas. Han sido clasificadas de acuerdo con los modelos de clasificación de sustancias elaboradas por el Reino Unido y Holanda. Incluye cloropreno, 1.2 Dicloroetano, triclorobenceno, trigluradín, compuestos organoestannicos, compuestos organofosforados, diclorvos, endosulfan, atrazina y limazina.

Litología: Descripción de un área por las diferentes rocas que la forman.

Litosfera: Envoltura exterior rocosa de la Tierra que rodea la centrosfera o núcleo.

Lixiviación: Proceso de separación de uno o más componentes de un material sólido mediante la acción del agua que actúa como disolvente.

Lixiviado: Líquido resultante del contacto de las basuras, fertilizantes y pesticidas agrícolas con el agua de lluvia, agua superficial o subterránea.

Lluvia ácida: Lluvia que contiene contaminantes que le confieren un pH inferior al normal; el pH normal de la lluvia está entre 5 y 6 y puede llegar a ser muy superior en zonas afectadas, llegando a valores entorno a 2,5. Problema ambiental producido por la emisión de óxidos de azufre (SO_2) y de nitrógeno (NOx) a la atmósfera. La consecuencia inmediata es la acidificación de la precipitación.

Lodos: Residuos semisólidos producidos en procesos de tratamiento de agua o de aire. Puede constituir un residuo peligroso. La Directiva 86/278 se refiere a la protección del medio ambiente y en particular, de los suelos, en la utilización de lodos de depuradora en agricultura. En España, RD 1310/1990, por el que se regula la utilización de los fangos de depuración en el sector agrario. // Este término, lodo, se aplica con más propiedad a los residuos pastosos de la industria minera. Es decir, la fracción seca es de naturaleza, esencialmente, inorgánica.

Lombricompostera: Recipiente usado para desarrollar la técnica de lombricultura, en donde lombrices, especialmente la roja californiana (*eisenia foetida*) descompone la materia orgánica obteniendo como producto un abono.

Longitud geográfica: La longitud de un punto de la superficie terrestre es el ángulo entre la vertical del punto y el meridiano origen de longitudes. Como tal se toma el meridiano de Greenwich. Se mide en grados sexagesimales y varía de 0° a 180°. Las latitudes orientales se designan con la notación E (por ejemplo 5°E) y las occidentales con W (por ejemplo 125°W). Como a 180° de longitud corresponden 12 horas, a cada grado de longitud corresponde una diferencia horaria 4 minutos.

Los Ángeles, ensayo a: Prueba a que se someten los materiales para averiguar la resistencia al desgaste.

Loza: Material cerámico poroso y no traslúcida.

Lumen: Unidad de flujo luminoso de una fuente de luz.

Lúpulo: Cereal usado básicamente para la fabricación de cerveza.

Lutita: Roca detrítica, es decir, formada por detritos, y está integrada por partículas del tamaño de la arcilla y del limo. Las lutitas de color negro son las más comunes y su color se debe a la presencia de carbono (material orgánico).

Luxímetro: Fotómetro que, por la sensibilidad de una célula fotoeléctrica, sirve para medir intensidades lumínicas.

LVMAP: Lámparas de descarga de gas a alta presión, de vapor de mercurio.

Macla: Intercrecimiento de dos o mas cristales sencillos del mismo mineral.

Macroclima: Clima de amplios espacios previamente definidos.

Macronutrientes: Son el nitrógeno, el fósforo, el potasio, el calcio, el azufre y el magnesio.

Madera silificada: Madera petrificada por el ágata o madera agatizada.

Maderas blandas: Árboles pertenecientes a las *gymnospermae*. Las maderas blandas más comerciales son las coníferas; ya que no poseen vasos que las endurezcan.

Maderas duras: Son árboles planifolios (dicotiledoneas). Estas especies poseen vasos en su madera.

Magnetita: Mineral de hierro constituido por óxido ferroso-diférrico (Fe_3O_4), a menudo con inclusiones de titánio y magnesio, que se caracteriza por poseer magnetismo. Se presenta en masas granuladas, granos sueltos o arenas de color pardo oscuro.

Malaton: Insecticida organofosforado. Se emplea en el control de los áfidos, langostas, polillas, etc. Es dañino para los peces y las abejas, pero uno de los organofosforados menos tóxico.

Mandioca: También conocida como: yuca, casava o casabe (*Manihot esculenta*) es un arbusto perenne de la familia de las euforbiáceas, extensamente cultivada en Sudamérica y el Pacífico por su raíz almidonosa de alto valor alimentario

Maneb: Fungicida del grupo del ditio carbamato que se emplea para mantener controladas enfermedades como el añublo de la patata y el moho en las hojas de la tomatera. Puede causar irritaciones en la piel y en los ojos.

Manglares: Terreno que en la zona tropical que cubren de agua las grandes mareas; está lleno de esteros que lo cortan formando muchas islas bajas, donde crecen árboles que viven en el agua salada.

Manning-Stricckler, fórmula de: Fórmula para determinar la velocidad del agua en un canal a partir del radio hidráulico y la pendiente.

Mantenimiento: Conjunto de actividades destinadas a conservar cualquier cosa con buena salud o en buen estado.

Mantillo: (Mantillo superficial), material de cubrición, por ejemplo compost o tierra vegetal, que se extiende sin ser enterrada.

Mapa eólico: Mapa en donde se consigan diversos datos de tipo eólico, tales como velocidades medias de viento, direcciones predominantes, regularidad, etc.

MAPP (Copolímero de anhídrido maléico y polipropileno): Aditivo de acople utilizado para mejorar la interfase química en la fabricación de fibra fique.

Marea negra: Capa de aceite mineral que cubre extensas superficies de agua de mar o continentales a causa de vertidos de crudo de petróleo o de sus derivados, generalmente por accidente de un sistema de transporte, por rotura de un oleoducto o bien por erupción de pozos petrolíferos.

Marea roja: Proliferación de ciertas algas marinas unicelulares productoras de toxinas, que al acumularse en el cuerpo de moluscos y crustáceos hacen peligroso su consumo.

Marisma: Terreno bajo y pantanoso que inunda las aguas del mar.

Mármol: Roca metamórfica, compuesta fundamentalmente por calcita, y como componentes secundarios, dolomita, flogopita, vesubiana, wollastonita, diópsido, grafito y tremolita, de color blanco, amarillento o parduzco, de grano fino a grueso, algunas veces con zonas de diferentes colores. Se origina en el metamorfismo regional y de contacto a partir de rocas calizas, apareciendo en la aureola de contacto alrededor de las rocas profundas. Sus principales aplicaciones son como material de construcción, como roca ornamental. Aunque la mayor parte de la piedra ofrecida como mármol es en realidad caliza, en sentido mineralógico, se llama mármol únicamente a la caliza metamórfica.

MARPOL: Convenio Internacional para la protección de la calidad del mar suscrito por países ribereños.

«Marro de café»: Término utilizado para denominar a los residuos generados en la elaboración de café que son factibles de valorizar energéticamente.

Marroquinerías: Lugares donde se confecciona artesanía y productos a partir de la piel animal curtida, como son los cinturones.

MasterBI: Marca registrada de plástico biodegradable.

Mata: Mezcla de sulfuros de metales pesados fundidos.

Materia disuelta total: Parámetro que mide la materia disuelta en el agua.

Materia inerte: En los RSU debería entenderse como tal, todo aquello que no constituye la materia fermentable o putrescible (restos de comida), como son: vidrio, papel y cartón, tejidos (lana, trapos y ropa), metales (férricos y no férricos), plásticos, madera, gomas, cueros, loza y cerámica, tierras, escorias, cenizas y otros.

Materia orgánica: Residuos de alimentos cocinados o no, restos de podas y jardinería, papeles y celulosa mojados. Es fácilmente fermentable y se utiliza para la fabricación de compost.

Materiales secundarios: Subproductos de otros procesos industriales que se utilizan en el proceso de fabricación sustituyendo a materiales vírgenes.

Materias en suspensión: Parámetro para determinar la calidad del agua que mide la cantidad de partículas que pueden ser decantadas o retenidas con un filtro de 0,45 micras en un volumen de agua.

Materias inhibidoras: Sustancias químicas que, disueltas en el agua, pueden dificultar el crecimiento de determinados organismos.

Materias oxidables: Sustancias presentes en el agua capaces de ser oxidadas.

Máximo nivel de contaminante deseado: El máximo nivel de un contaminante para cuya dosis no se conocen efectos adversos sobre la salud e incluye un adecuado margen de seguridad.

MDL (Mecanismos de Desarrollo Limpio): Son instrumentos creados contemplados en el Protocolo de Kioto, mediante el cual los países desarrollados pueden cumplir sus metas a través de proyectos implementados en países en vías de desarrollo con tecnologías compatibles con el desarrollo sostenible.

Medio: Entorno específico (aire, agua, suelo) donde hay sustancias y se desarrollan actividades sujetas a regulaciones.

Medio ambiente: Es el conjunto de los elementos bióticos (flora y fauna) y abióticos ~~en~~ergía solar, agua, aire y tierra mineral ~~q~~ue integran un determinado espacio, afectan a la vida, al desarrollo y a la supervivencia de un organismo, y que permiten el desarrollo de ecosistemas. Decisión 85/338, modificada por la Decisión 90/150 y la Directiva 90/313, relativa a información sobre el estado del medio ambiente.

Megavatio: Unidad de potencia equivalente a un millón de vatios. La potencia de las grandes centrales eléctricas se expresa en esta unidad.

Mejor Técnica Disponible (**MTD):** Tecnología más avanzada del mercado por un sector de actividad, capaz de reducir al mínimo las emisiones y soportable o incluso rentable desde el punto de vista económico.

Melánico: Suelo de color oscuro, con elevado contenido de materia orgánica, característico de suelos volcánicos muy evolucionados.

Melanina: Pigmento de color negro o pardo negruzco en forma de gránulos que existe en el protoplasma de ciertas células de los vertebrados; a ella deben su coloración especial la piel, el pelo o la coroides en los ojos.

Melanosis: Toxicidad debida a la ingesta de arsénicio.

Melazas: Jarabes de azúcar residual de la caña de azúcar, de los que no se puede extraer azúcar cristalino por medios directos. Constituyen una materia prima importante en la fabricación del alcohol etílico y de otros alcoholes.

Meleza: Formaciones vegetales. Espesura que forma la multitud de arbustos (por ejemplo, zarzales, jarales, etc.).

Membrana: Tabique poroso. La calidad del material en el que se halla construido el tabique así como el diámetro del poro (o perforación) define una innumerable cantidad de tipos de membranas.

Mena: Mineral o roca que contienen sustancias que se pueden benificiar.

MER (Materiales Específicos de Riesgo): Desechos específicos de bovino. Corresponde a los desechos de vacas que se encontraron que representan un riesgo para la población como son: timo, cerebro, espina dorsal, intestino, bazo y tonsilas.

Mercaptano: Tioalcoholes CnHN + 1S. Con excepción del metilmercaptano gaseoso, son líquidos de un olor nauseabundo. Se utilizan como mezcla para detectar la presencia de gases naturales inodoros.

Mercerización: Acción de *mercerizar*.

Mercerizar: Proceso donde se tratan los hilos y tejidos de algodón o fibras similares con una solución de sosa cáustica para que resulten brillantes. Fue inventado por el químico inglés, J. Mercer (1791-1866).

Mercurio: Símbolo Hg. Metal blanco, líquido a la temperatura ordinaria. Se halla en las minas en estado natural, pero principalmente en combinación con el azufre formando el cinabrio. Forma parte de compuestos orgánicos. Cuando se inhala o ingiere daña el sistema nervioso y produce el hidrargismo, enfermedad mortal. Se utiliza en las industrias químicas y de plásticos. Directivas 82/176 y 84/156 relativas a los valores límite y a los objetivos de calidad para los vertidos de mercurio del sector de la electrólisis de los cloruros alcalinos y otros sectores. También la Directiva 90/ relativa a las pilas alcalinas de manganeso que contengan más del 0,25% en peso de mercurio, a partir del 1.1.1993.

Meridiano: En la superficie terrestre, considerada esférica, círculo máximo que pasa por los polos. De especial significación es el meridiano origen de longitudes. Como tal se utiliza por amplio consenso el de Greenwich.

Merma: Diferencia entre la masa de entrada de un material a un proceso y su peso a la salida.

Mesa densimétrica: Máquina utilizada para separar impurezas de un producto mediante movimientos vibratorios y corrientes de aire, según las diferentes medidas y densidades de las partículas.

Mésico: Aquel terreno cuya temperatura media anual oscila de 8 a 15 ℃.

Mesofílico: Etapa de un proceso de digestión anaeróbia con temperaturas que no superan los 40 ℃.

Mesolítico: Vegetación de áreas de clima templado.

Mesopausa: Capa atmosférica que separa la mesosfera y la ionosfera a unos 50-80 km de altura. A partir de ella, la temperatura va aumentando con la altura.

Mesosaprobico: Volumen de agua en el que la materia orgánica se descompone rápidamente y en el que el nivel de oxígeno es muy bajo.

Mesosfera: Región de la atmósfera de la Tierra situada encima de la estratosfera, entre los 50 y 85 km, en que la temperatura primero aumenta hasta alrededor de +80 ℃ y que después cae hasta un mínimo de –65 ℃ alrededor de los 80 km, y hasta alcanzar la más baja de toda la atmósfera llegando a los –100 ℃.

Meta-arcilla: Compuesto resultante del calentamiento de una arcilla por encima de los 500℃ pero sin llegar a la temperatura de ceramización. Algunas metaarcillas tienen propiedades puzolánicas.

Metabolismo: Todas las reacciones químicas que tienen lugar en un organismo. Normalmente se mide por la cantidad de energía u oxígeno que el organismo utiliza en un periodo de tiempo.

Metabolito: Producto de las reacciones metabólicas de los seres vivos.

Metacrilato: Sal del ácido metacrílico. Los polímeros, como el plexiglás, son ésteres de este ácido.

Metahemoglobina: Hemoglobina que no puede retener oxígeno. Compuesto de hemoglobina y oxígeno, más estable que la oxihemoglobina, y que se obtiene por la acción de agentes oxidantes sobre la sangre, como en los casos de envenenamiento por nitratos o cloratos. Un porcentaje de 60-70% de metahemoglobina produce la muerte.

Metal pesado: Cada uno de los metales que tienen un peso atómico relativamente alto y una densidad mayor de 5 g/cm^3, como por ejemplo mercurio, cromo, cadmio, arsénico y plomo. En pequeñas concentraciones pueden dañar los seres vivos. Tienden a acumularse en el organismo.

Metam-sodio: Fumigante del suelo del grupo de los ditio carbomatos que se emplea para eliminar hongos del suelo, lombrices de tierra y para evitar la germinación de las hierbas. Es irritante para la piel y los ojos.

Metanal: Gas incoloro y punzante, de fórmula HCHO, muy tóxico e inflamable, producto de la descomposición y de la combustión incompleta, usado como desinfectante y conservante.

Metanización: Proceso bioquímico por el que a través de bacterias, en atmósfera carente de oxígeno, parte de la materia orgánica se transforma en metano.

Metano (CH_4): El más simple de los hidrocarburos (hidrocarburo saturado o alkano), se encuentra en estado natural en los pozos de petróleo, en las minas y en ciertas ciénagas. Principal integrante del gas natural. Otra fuente natural son las fermentaciones anaerobias, las zonas húmedas y los océanos. El grisú es una mezcla de metano y aire; el gas de hulla contiene una gran proporción de metano. La vida estimada es de 1 a 8 años.

Metanol: Alcohol (CH_3OH). Usado como carburante ya que produce menor polución en la combustión que la gasolina.

Metanólisis: Proceso avanzado de reciclado que consiste en la aplicación de metanol en el PET. Este poliéster (el PET), es descompuesto en sus moléculas básicas, incluido el dimetiltereftalato y el etilenglicol, los cuales pueden ser luego repolimerizados para producir resina virgen.

Metaxicloro: Insecticida clorado.

Metazoo: En contraposición a los organismos unicelulares (protozoos), los metazoos llegan hasta los animales superiores.

Meteorología: Ciencia que trata los fenómenos acaecidos en la atmósfera y de los meteoros.

Metil paration: Insecticida organofosforado.

Metil-mercaptano (CH_3-SH): Se produce de forma natural en emisiones biológicas anaerobias, emanaciones y estiércol de animales. Como formas antropogénicas están la fabricación de pulpa de papel, ladrillos y refino de petróleo. Vida estimada tres días.

Mica Moscovita: Especie más común del grupo de las micas, es conocida como mica blanca o mica potásica por el color plateado y su brillo nacarado. Se presenta en cristales tabulares de contorno hexagonal o en láminas flexibles y elásticas. Es componente de varios tipos de rocas. Se la encuentra en rocas ígneas de tipo ácido, tales como pragmatitas o granitos y en rocas metamórficas, en particular en micacitas, gneis y en los filadios.

Micas: Minerales de arcilla pertenecientes a un grupo de silicatos de alúmina, hierro, calcio, magnesio y minerales alcalinos. Las particulares características de elasticidad, flexibilidad y resistencia al calor de las láminas, hacen que constituyan un precioso material para la industria debido a sus propiedades como aislantes eléctricos y térmicos. Generalmente se las encuentra en las rocas ígneas tales como el granito y las rocas metamórficas como el esquisto.

Micología: Estudio de los hongos y las setas.

Micorrizas: Son el resultado de la asociación de hongos con raíces de vegetales. Son beneficiosas para suelos pobres y aumentan la resistencia a la sequía.

Micro nutrientes: Son el manganeso, hierro, cobre, boro, molibdeno, zinc, cloro entre otros.

Microclima: Condiciones climáticas existentes dentro de un sector muy reducido, en ocasiones creadas artificialmente.

Microfiltración: Técnica de filtración por medio de membranas porosas de luz de malla situada entre 50-1 micras.

Microfitas: Se llama así, a los vegetales inferiores que son invisibles al ojo desnudo, como bacterias, ciertas algas y hongos.

Microsílice: Sílice amorfa, de fórmula SiO_2, que se halla en muchas especies vegetales como la cascarilla de arroz, o bien en polvos de filtros de mangas, como las ferroaleaciones. Se trata de un sofisticado material de construcción.

MIMAM: Es el Ministerio de Medio Ambiente es Español y el departamento encargado de la propuesta y ejecución de la política del Gobierno en materia de conservación de la naturaleza, desarrollo sostenible, impacto ambiental y ordenación de la flora, la fauna, los hábitat y los ecosistemas naturales, así como de la colaboración con las comunidades autónomas para la realización de las actuaciones que correspondan en estas materias, la gestión y custodia del dominio público marítimo terrestre y de todas sus actuales competencias.

Mineral: Todas las sustancias inorgánicas naturales homogéneas que tienen una composición química definida, una estructura cristalina, color y dureza características.

Mineralización: Conversión de una forma orgánica de un elemento en otra forma inorgánica mediante los procesos de descomposición microbiana.

Minicentral: Pequeña central hidroeléctrica que tiene una potencia instalada de hasta 5.000 KVA.

Minimización: Forma preventiva de la contaminación. Se refiere a la puesta en práctica de medidas de organización, operativas y tecnológicas necesarias para disminuir (hasta niveles económica y técnicamente factibles) la cantidad y toxicidad de los subproductos generados que implican un tratamiento o eliminación final. La primera fase es la reducción en origen y cuando ésta no es posible debe reciclarse o recuperar la energía de los componentes.

Minio: Óxido de plomo. Se usa como pintura antioxidante.

Mirex: Insecticida clorado.

Mix de energías renovables: Concepto que se aplica al conjunto de tecnologías utilizadas para generar energía de origen renovable.

Mix: (eléctrico) Se entiende por tal a la combinación de procesos para la generación de electricidad. Por extensión se puede aplicar al sistema de tratamiento de residuos (mix de tecnologías).

Mixomatosis: Enfermedad virásica de los conejos utilizada en Australia para disminuir las enormes poblaciones de conejos que resultaron tras la introducción de la especie por carecer de predadores. En cambio, en Europa la mixomatosis tiene efectos desastrosos sobre las poblaciones de conejos.

MJ: Mega Joule. Un MJ corresponde aproximadamente a 0,239 kwh.

Modelización: Programa informático que extrapola los posibles impactos ambientales a partir de unos parámetros de partida.

Módulo de Young: ó también conocido como el módulo de elasticidad (longitudinal), es un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico lineal e isótropo. Esta propiedad se define como la razón entre el incremento de esfuerzo aplicado a un material y el cambio correspondiente a la deformación unitaria que experimenta, en la dirección de aplicación del esfuerzo.

Moho: Hongo microscópico que se desarrolla en la materia orgánica en descomposición. Es la causa de la podredumbre de muchos productos vegetales.

Mohs, escala de: Serie de minerales usados para medir la dureza de los materiales en una escala del 1 (talco) al 10 (diamante).

MOL: Término para expresar, en gramos, el número atómico de un elemento. Así un mol de carbono son 12 g. 1 mol de cualquier gas, a condiciones normales, ocupa 22,4 l.

Moldeado: Operación que consiste en dar forma a una sustancia o a un material por medio de un molde.

Molécula: La partícula más pequeña de una sustancia que es capaz de existencia independiente conservando sus propiedades químicas.

Moneras: Microorganismos que viven en el suelo.

Monitoreo: Sistema de observación, medidamente o evaluación de un fenómeno o de un proceso con la finalidad de poder realizar, en caso necesario, intervenciones correctoras.

Monocultivo: Cultivo de una sola especie, año tras año, con la exclusión de todas las demás posibilidades. Esta práctica favorece las plagas; la diversidad agrícola es la fuente de estabilidad ecológica.

Monómero: Molécula mas o menos compleja que puede encadenarse hasta formar un polímero. Por ejemplo, tanto la celulosa como el almidón están compuestos por la glucosa (monómero).

Monovertedero: Vertedero destinado a acoger un solo tipo de residuo.

Monóxido de carbono (CO): Gas tóxico, incoloro e inodoro producido por una combustión incompleta del combustible. Es tóxico y venenoso; se combina con la hemoglobina de la sangre formando carboxihemoglobina y provoca pérdida de reflejos y la muerte. Sus propiedades como agente reductor rinden valiosos servicios en muchos procesos industriales. Las fuentes naturales son la oxidación natural e incompleta de hidrocarburos y biomasa (fuego de bosques, océanos, etc.) y las antropogénicas son la oxidación incompleta de hidrocarburos y biomasa (petróleo, carbón, incineradoras, vehículos, industrias, etc.). La vida estimada es de 30-90 días. Directivas comunitarias 89/369 y 89/429 relativas a la emisión de CO de las incineradoras.

Montmorillonita: Mineral de arcilla formado por un silicato complejo. Es altamente hinchable en agua. Presenta compatibilidad con la mayoría de los ingredien-

tes, y sinergismo con las gomas orgánicas. Se puede usar en un amplio rango de pH.

Moqueta: tela fuerte de lana, cuya trama es de cáñamo y de la cual se hacen alfombras y tapices.

Morrena: Lecho de rocas que deja tras de si un glaciar.

Mosaico: Pavimento formado por piezas cerámicas, mármol o vidrio de pequeño tamaño con motivos decorativos.

Moscovita: también denomiada como «Biotita blanca», se trata de una mica (minerales pertenecientes a un grupo numeroso de silicatos) potásica monocíclica. Se presenta en forma de cristales de contorno hexagonal que forman frecuentes maclas. Las hojas son flexibles y elásticas, suaves, traslúcidas, de brillo anacarado y ligeramente coloreadas.

Motocultor: Máquina agrícola de pequeñas dimensiones que se sostiene manualmente, proveída a la parte delantera de un ángulo de dientes curvos que giran alrededor de un eje, que sirve para remover la tierra.

Motor diesel: Motor de explosión en que el carburante se inflama por la comprensión a que se somete, junto con el aire en la cámara de combustión, sin necesidad de bujías. Existe un conjunto de Directivas relativas a la construcción del vehículo, no a la calidad del carburante; Directivas 72/306, 77/537, 80/77 y 87/351, con medidas contra la contaminación atmosférica causada por las emisiones de los vehículos de motor.

Motor gasolina de explosión: El que funciona por la energía producida por la combustión de una mezcla de aire y gasolina. Las altas temperaturas que alcanza producen sustancias contaminantes, como son los óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono (CO) y residuos hidrocarburos (CxHy). Directivas 70/220, 74/290, 77/102, 78/665 y 83/8351 ya derrogadas, y la última aprobada 89/491 supone la instalación de un catalizador en todo vehículo.

MOX: Óxido de uranio y plutonio que puede usarse como combustible de fisión en un reactor de regeneración y, parcialmente, en los convencionales.

MSDS: *Material Safety Data Sheet*. Equivale, en español, a la «ficha de seguridad», el documento que debe obligatoriamente acompañar las sustancias químicas clasificadas como peligrosas según las normas comunitarias. Indica todas las características quimicofísicas, el grado de toxicidad, las medidas a tomar y las intervenciones a efectuar en caso de fugas, etc.

MTBE: Metil terbutil éter. Sustancia derivada del alcohol que se añade a las gasolinas convencionales.

Muestreo isocinético: Muestreo en que la dirección y la velocidad de captación de las muestras coincidan con las del efluente gaseoso.

Mulch: Mezcla de nutrientes. Cubierta orgánica e inorgánica que protege al suelo y a la semilla depositada en el mismo, que se aplica durante la revegetación.

Mulching o acolchado, técnica muy usada, consistente en la extensión de una cubierta plástica sobre el terreno para proteger los cultivos de los cambios de temperatura día/noche, evitar la formación de malas hierbas (cubierta negra con el cultivo creciendo por encima de ella), depredadores. Se utiliza principalmente PE lineal y PEBD.

Mullisoles: Las tierras de pasto están caracterizadas por una delgada y rica capa superficial que cubre una amplia variedad de perfiles con una estructura bien desarrollada, incluyéndose el pasto, el suelo castaño, praderas rojas y las tierras pardas de bosque.

Mullita: Mineral difícil de encontrar en estado natural. Se forma en el enfriamiento de numerosos procesos cerámicos. Se trata de un silicato aluminoso de altísima resistencia mecánica, refractario y que soporta las agreciones químicas.

Multibarrera: Interposición de diferentes barreras independientes para el aislamiento de los residuos en un vertedero controlado.

Multiciclones: Equipo compuesto por varios ciclones para el tratamiento de gases.

Multímetro: Instrumento que sirve para medir diferentes parámetros eléctricos: voltaje, intensidad, resistencia, etc.

Murga: Pósito o residuo que se produce en el fondo de los depósitos de aceite y que tiene un aspecto turbio.

Muro trombe: Pared de una habitación, constituida por un muro de espesor importante (40 cm) de color oscuro, delante del cual hay instalada una vidriera, que sirve para captar la energía solar. Esta se transfiere al interior de la edificación por convección natural, a través de orificios previstos en la parte baja y en la alta del muro. El muro irradia su calor durante la noche al interior de la habitación (Véase *Arquitectura bioclimática*).

Musgos: Plantas del grupo de las Briofitas. Son plantas verdes, criptógamas (carecen de vasos conductores y flores). Tienen un ciclo biológico con alternancia clara de generaciones (gametofito haploide y esporofito diploide). Son plantas dulceacuícolas y terrestres de pequeño porte que crecen tapizando superficies.

Mutación: Cambio brusco y hereditario en el genotipo o elementos hereditarios del citoplasma. Se clasifican según su naturaleza, según afecten al cromosoma o al germen, a los cromosomas o sólo a un gen.

Mutagénesis: Mutación provocada por agentes físicos, químicos o biológicos. Los agentes más comunes son los rayos X, los rayos ultravioleta, los gases químicos, etc.

Mutagénico: Sustancias con propiedades de provocar mutación.

Mutágeno: Productos químicos (gas de mostaza o uretano), rayos ionizantes y ultravioleta que provocan mutaciones.

NACE: Abreviación de Nomenclatura de Actividades Económicas de la Comunidad Europea. Ésta es una

clasificación de actividades económicas a nivel del Estado Español elaborada según las condiciones recogidas en el Reglamento de implantación de la NACE Rev. 1.1. Su objetivo es establecer un conjunto jerarquizado de actividades económicas que pueda ser utilizado para: implantar estadísticas comunitarias; servir de marco para la comparación comunitaria e internacional de estadísticas y entidades según la actividad económica que ejerzan; constituir reglamentariamente el marco para el desarrollo de clasificaciones nacionales de actividades económicas.

Naftalenos: Conjunto de hidrocarburos de cadena saturada, de fórmula general CnH_{2n}. Se denominan naftalenos por hallarse en el petróleo.

Naftalina: ($C_{10}H_8$). Sólido blanco que se evapora fácilmente y se produce naturalmente cuando se queman combustibles. También se llama alquitrán blanco y alcanfor blanco, y se ha usado en bolas y escamas para polillas, aunque su principal uso comercial es en la manufactura de plásticos de cloruro de polivinilo (PVC). Quemar tabaco o madera produce naftalina. Tiene un olor fuerte, aunque no desagradable.

Naftilamina: Es un material cristalino (similar al azúcar o a la arena) blanco o amarillo que cambia a un color rojo púrpura después de haber sido expuesto al aire. Se utiliza en la fabricación de tintura y caucho, y para controlar malezas. Se encuentra en la lista de sutancias peligrosas porque está reglamentado por OSHA y porque ha sido citado por DOT, DEP. NFPA, NIOSH y USEPA.

Nanocristales: Partícula nanoscópica que contiene desde unos pocos cientos a decenas de millares de átomos, los cuales están dispuestos ordenadamente, siguiendo una estructura cristalina.

Nanofillers: Primera partícula compuesta, usada como recubrimiento (fillers) o como refuerzo en polímeros con tamaño de partículas muy pequeñas (en la escala de nanómetro).

Nanoporosas: Característica de algunos instrumentos como son las membranas donde los poros poseen un diámetro de 10°

Nanomateriales: Materiales a nanoescala. Materiales con características estructurales de una dimensión entre 1-100 naóometros. Los nanomateriales pueden ser subdivididos en nanopartículas, nanocapas y nanocompuestos. Desde el punto de vista comercial y desarrollo, existen tres categorías básicas de nanomateriales: óxidos metálicos, nanoarcillas y nanotubos de carbono.

Nanotubos: Estructuras tubulares cuyo diámetro es del orden del nanómetro 10^9. Existen nanotubos de muchos materiales, tales como silicio o nitruro de boro pero, generalmente, el término se aplica a los nanotubos de carbono. Los nanotubos de carbono son una forma elemental de carbono, como el diamante, el grafito o los fullerenos y se observan como láminas de grafito enrolladas sobre sí mismas.

Napa: Napa acuífera o freática, bolsón de agua subterránea.

Naproxeno (nombres comerciales: Aleve, Anaprox, Naproxyn, Naprelan, Momen). Es un antiinflamatorio no esteroideo (AINE) de uso general, empleado en el tratamiento de dolor suave a moderado, la fiebre, la inflamación y rigidez provocadas por afecciones como la osteoartritis, artritis reumatoide, artritis psoriática, espondilitis anquilosante, lesiones, calambres menstruales, tendinitis y bursitis, y en el tratamiento de la dismenorrea primaria. Actúa inhibiendo la síntesis de prostaglandinas, pero su mecanismo exacto de actuación es desconocido.

Naranja, Agente: Ver *TCDD.*

NDN: (Nitrificación/desnitrificación). Procedimiento utilizado en la depuración de las aguas residuales con el objeto de eliminar el nitrógeno amoniacal (NH4+) contenido en ellas y transformarlo a nitrógeno gas (N_2).

Necrosis: Muerte celular.

Néctar: Jugo azucarado que segregan muchas plantas por órganos especiales, los nectarios, situados generalmente en la flor.

Negro, humo: Variedad de carbón producido al quemar gas en malas condiciones de oxidación (hollín). Es una de las variedades más puras de carbón amorfo, con un 98,6% de C y un 1,4% H. Se usa para fabricar tinta, betunes, pinturas, artículos de caucho, etc.

Nematicida: Sustancia química utilizada en el control de los gusanos nematodos. Suelen ser compuestos dinitro, organoclorados y organofosfóricos y se emplean para matar la anguílula de la remolacha, la que infecta la patata, etc.

Nemátodos: Denominación genérica de animales filamentosos comunes, con más de veinte mil especies registradas y un número estimado mucho mayor. La palabra «Nematodo» es una derivación de nematoide, que significa «similar a un hilo». Incluye a organismos que reciben nombres comunes como «gusanos redondos», «gusanos filamentosos», «lombrices» o «anguílulas» (si bien no todos los animales que reciben estos nombres vulgares pertenecen necesariamente al grupo Nematodos).

Neopreno: Marca comercial de DuPont para una familia de gomas sintéticas basadas en el policloropreno (polímero del cloropreno). Conocido originalmente como dupreno (duprene en inglés), fue la primera goma sintética producida a escala industrial. Se usa en una gran cantidad de entornos, como trajes húmedos de submarinismo, aislamiento eléctrico y correas para ventiladores de automóviles. Su inercia química lo hace útil en aplicaciones como sellos (o juntas) y mangueras, así como en recubrimientos resistentes a la corrosión. También puede usarse como base para adhesivos. Sus

propiedades lo hacen útil como aislante acústico en transformadores. Su elasticidad hace que sea muy difícil plegarlo. Su flexibilidad también lo hace apto para diseñar fundas que se ajusten perfectamente al objeto a proteger.

NESHAPs: *National Emissions Standard for Hazardous Air Pollutants*. Estándares de Emisión Nacionales para contaminantes de aire peligrosos establecidos por la USEPA que pueden causar muerte o importantes enfermedades irreversibles.

Neurotransmisores: Sustancia, como el acetilcolina, que «lleva» el mensaje desde el terminal de una fibra nerviosa a otra. Las sustancias organofosforadas (insecticidas) hidrolizan el neurotransmisor e inutilizan su misión.

Neutralización: Operación que tiene lugar en el tratamiento de aguas, que consiste en dosificar una base o un ácido para ajustar el pH al valor neutro.

NFU (Neumáticos Fuera de Uso): Aquellos neumáticos usados, enteros o troceados, procedentes de turismos, furgonetas, camiones ligeros y grandes traileres. Los NFU´s están compuestos fundamentalmente por cauchos naturales y artificiales, alambre de acero, negro de humo y otros materiales de carga (derivados del sílice) y aditivos.

Nicho ecológico: Espacio vital que corresponde a una especie y sólo a ella ofrece las condiciones de vida que necesita. Lugar ocupado por cada especie en los ecosistemas.

Nicotina: Alcaloide extraído de las hojas del tabaco y que se usa como insecticida para eliminar los áfidos y otros insectos que atacan la huerta y los frutales. Actúa como veneno de contacto por fumigación, y aunque es tóxico para los mamíferos, pierde rápidamente su toxicidad después de ser aplicado. Es mortal en dosis de 50 mg. Se trata de un líquido incoloro tipo aceitoso, que en contacto con el aire se colorea rápidamente a marrón. Se disuelve en agua y en la mayoría de los disolventes orgánicos. En pequeñas dosis actúa como excitante sobre el sistema nervioso y en una concentración mayor como paralizante.

Niebla: Ver «smog».

Nimby (efecto o síndrome): *Not in my backyard* o no en mi patio trasero. Forma generalizada de protesta por la ubicación de plantas de tratamiento y depósito de residuos cerca de núcleos urbanos.

Nitratos: Sales formadas por la acción del ácido nítrico sobre los óxidos metálicos, hidróxidos y carbonatos. Fácilmente solubles en el agua; se descomponen al ser calentados. Pueden provocar efectos adversos en los humanos o animales.

Nitrificación: Transformación de los compuestos nitrogenados procedentes de la descomposición de las proteínas en nitritos y después en nitratos. Es muy importante la rápida transformación de los nitritos por las bacterias ya que estas sales son venenosas para las plantas superiores.

Nitro de Chile: Nitrato sódico. Como que se trata de una sal muy soluble solo aparece en zonas desérticas (norte de Chile).

Nitrógeno amoniacal: Concentración de nitrógeno contenido en forma amoniacal del agua.

Nitrógeno Kjeldahl: Parámetro que determina la concentración de nitrógeno en forma de amonio, proteínas, aminas, etc., de una muestra.

Nitrosamina: Cualquier de una serie de compuestos orgánicos en los cuales -N-N-O está unido a un grupo alquilo o arilo, por ejemplo difenilnitrosamina. Estos compuestos están formados por la reacción entre una amina y Nox o nitritios. Se encuentran en muchos productos alimenticios: wiskies, herbicidas y cosméticos, y en ambientes industriales como en industrias del curtido de cuero, fábricas de caucho y fundiciones de hierro.

Nitrosomona: Bacteria nitrificante usadas en la depuración de aguas residuales que oxidan las formas de nitrógeno.

Nitruro de silicio: Compuesto cerámico que responde a la fórmula NSi. Es extremadamente refractario, soporta más de 2.500 ℃ y, a esta temperatura, mantiene todas sus propiedades mecánicas.

Nivel de inmisión: Cantidad de contaminantes concentrados en un punto receptor cualquiera y procedente de diversos focos de emisión, por unidad de volumen de aire.

Nivel de presión sonora: Presión sonora expresada en decibelios en relación a una presión de referencia que puede ser de 1 microbario o 2 $x10^{-4}$ microbarios.

Nivel de ruido (sonoro): Valor de un sonido calculado en decibelios. Presión sonora en un punto de un campo sonoro determinado en la forma específica por las normas. La lectura del instrumento en decibelios corresponde a un valor de la presión del sonido integrado en el margen de frecuencias audibles, con un tiempo de integración y una valoración de frecuencia determinados. En España se había regulado la contaminación sonora bajo el Reglamento de Actividades Clasificadas de 1961, que califica como molestas las actividades que constituyan una incomodidad por ruidos o vibraciones. A partir de 1980 las ordenanzas Municipales elaboran disposiciones sobre niveles de emisión sonora exigibles, insonorización y medidas correctoras. El nivel sonoro admisible en los vehículos de motor (y dispositivo de escape) está regulado por la Directiva comunitaria 70/157 y modificada por las Directivas 73/350, 77/212, 81/334, 84/372, 84/424, 87/354 y 89/491.

Nivel de sonoridad: El nivel de sonoridad de un sonido determinado es la intensidad del tono de referencia, 1.000 Hz, en la escala fono, la cual es ajustada hasta ser igual en sonoridad aparente al sonido determinado.

Este ajuste de igualdad puede hacerse subjetivamente, o bien objetivamente por medio de un medidor de nivel de sonido.

Nivel máximo permisible: Término general para cubrir el grado mayor de contaminación permitido, producido por cualquier causa, pero especialmente aplicable a sustancias radioactivas.

Nivel piezométrico: Nivel al que llega el agua en un pozo o sondeo de acuerdo con la presión del acuífero.

Nivel sonoro percibido: Nivel de presión sonora entre un tercio de octava y una octava de un ruido cualquiera a 1.000 Hz, al cual gente «normal» considera igual un ruido que un sonido de interés.

Nivel trófico: Pertenecen al mismo nivel trófico aquellos organismos que obtienen su alimentación a partir de las plantas dando el mismo número de pasos intermedios (o de eslabones de una cadena alimentaria). Así, las plantas ocupan el primer nivel trófico, los herbívoros el segundo, los carnívoros que se comen a los herbívoros el tercero, etc.

Niveles sonoros (LX): Niveles que exceden el normal o permitido durante un cierto periodo de tiempo; así, un nivel sonoro L50 es uno que excede al normal o permitido durante un 50% del tiempo

Nivómetro: Aparato para la medida de la cantidad de nieve caída en un lugar dado durante un intervalo de tiempo. La cantidad de nieve puede determinarse mediante un dispositivo de recogida o midiendo verticalmente su espesor.

Noosfera: Concepto de biología según el cual una comunidad de organismos vegetales y animales, en una esfera de vida creada artificialmente, ha de integrar aquellas sustancias tóxicas al medio con las que no puede acabar la biosfera.

Normas de emisión: Controlan el agente contaminante en su origen, en el emisor. Indican valores límite o máximos del agente contaminante en la salida del emisor al ambiente exterior. La ventaja de este método es su carácter objetivo: todas las instalaciones industriales del sector determinado tienen que cumplir los mismos límites.

Normas de inmisión: U objetivos de calidad. Se mide el agente contaminante en el medio receptor. No favorece la igualdad entre las instalaciones industriales ni la libre competencia entre los países al aplicar las medidas contaminantes.

Nota de referencia: Nota de 1.000 periodos por segundo, que se emplea como referencia para medir el nivel de intensidad de los ruidos y otros sonidos.

Nucleido: Conjunto de núcleos atómicos formados por el mismo número de protones que tienen el mismo número de masa.

Nucleónica: Investigación que se ocupa de la aplicación de los principios de la física nuclear a la solución de problemas técnicos.

Número de mach: Relación entre la velocidad de un cuerpo o entre la del flujo de un fluido y la velocidad del sonido en el mismo medio. Para Mach 1, la velocidad es sónica; por debajo de Mach 1, es subsónica; por encima de Mach 1, es supersónica y crea una onda de mach (o de choque). En el aire, las condiciones hipersónicas se alcanzan para números de Mach entre 5 y 10 según la altitud y la temperatura.

Número de octanos: Parámetro que define la calidad de la gasolina. Una gasolina de alto octanaje tiene mayores propiedades antidetonantes que la de bajo octanaje. El número de octanos puede incrementarse refinando más la gasolina o añadiéndole tetraetilo de plomo. Las Directivas 78/611, 85/210 y 87/416 imponen un octanaje mínimo de 85,0 por razones de protección a la salud y el medio ambiente.

Nutrientes: Cualquier sustancia asimilada por los organismos vivos que ayuda a su crecimiento. El término se utiliza normalmente para referirse al nitrógeno y fósforo presentes en aguas residuales.

Nylon: Nombre genérico que reciben las resinas poliamídicas. El nylon normal (nylon 66) se fabrica con ácido adípico y hexametilendiamina.

Objetivos medioambientales: (Reglamento auditoría medioambiental DOCE 30.04.93). Los objetivos concretos, en relación de su comportamiento medioambiental, que una empresa se propone alcanzar.

Oblea: Corte, o loncha, extremadamente fino de material semiconductor utilizado como sustrato en microelectrónica y en tecnología fotovoltaica.

OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico): Fundada en 1961, sustituyó a la Organización Europea de Cooperación Económica (OECE). Reunió 24 países, 19 de los cuales son europeos. Los países no europeos son Estados Unidos, Canadá, Australia, Japón y Nueva Zelanda. Sus objetivos son la planificación e intensificación de la colaboración económica entre los países miembros y la coordinación de la ayuda al desarrollo por medio del Development Assistance Committee (DAC). Trata también de los problemas de la preservación del medio, tiene un Comité Ambiental muy activo en el análisis y en la definición de los principios y puntos de guía en muchas áreas de interés ambiental, con particular cuidado a los problemas de carácter internacional.

Oceanografía: Ciencia que estudia los mares y sus fenómenos, así como la fauna y la flora internacional.

Octanaje: es una escala que mide la resistencia que presenta un combustible como gasolina a detonar prematuramente cuando es comprimida dentro del cilindro de un motor y es su característica más importante; también se denomina RON (Research Octane Number). Véase *Número de octanos*.

Octanos: Hidrocarburo de la serie de las parafinas. Existen 18 compuestos de esta fórmula (isómeros). El oc-

tano normal es un líquido incoloro, de punto de ebullición 126 ℃ que se encuentra en el petróleo. Se obtiene por síntesis. Valores de antidetonancia. Véase *Número de octanos*.

Odorantes: Productos naturales o químicos que producen olores aromáticos. Se utilizan en alimentos y bebidas y su uso está sometido a reglamentaciones técnico-sanitarias.

Offshore: Palabra inglesa que literalmente significa «fuera de la costa» y que hace referencia al espacio de la plataforma marítima continental, en la que pueden desarrollarse generadores eólicos, prospecciones y explotaciones de carácter petrolero y de minería en general.

Ofimática: Disciplinia que se ocupa de entregar tecnología a un espacio cerrado; ya sea un oficina, una habitación, un salón, etc.

OIEA (Organización Internacional Energía Atómica): Organización intergubernamental autónoma creada en 1957 y vinculada a las Naciones Unidas mediante un acuerdo especial. Compuesta por 112 miembros. Entre sus actividades en materia de Medio Ambiente está el procurar una gestión segura de los residuos radioactivos que se originan en todas las fases del ciclo del combustible nuclear, procedimientos de vigilancia aplicables en caso de descarga de materiales radioactivos en el medio ambiente durante el funcionamiento normal de centrales nucleares, etc.

Olefina: Hidrocarburos de la serie del eteno. También se denominan alkenos. // Formador de aceite.

Oleína: Residuos resultante del refinado de los aceites vegetales. Están constituidas por una mezcla de ácidos grasos y triglicéridos.

Oleoducto: Infraestructura de transporte de productos petrolíferos líquidos.

Oligoelementos: Materias minerales necesarias, en pequeñas cantidades, para plantas, animales y hombres. Normalmente se hallan en cantidad suficiente en el suelo y la alimentación. La falta de oligoelementos provoca graves enfermedades como la avitaminosis, enfermedades de carencia, inanición, etc.

Oligosapróbico: Volumen de agua en el que la materia orgánica se descompone muy lentamente y el contenido en oxígeno es muy elevado.

Oligosaprobios: Organismos que viven en agua con poca cantidad de materia orgánica y de sales y gran proporción de oxígeno en disolución.

Oligotrófico: Volumen de agua dulce pobre en nutrientes vegetales e improductivo. Son aguas claras que suelen estar poco oxigenadas. //Ecosistema de márgenes rocosas y escarpadas y vegetación litoral escasa.

Oligotrofo: Medios pobres en materias asimilables, sobre todo en nitrógeno.

Olivino: Mineral (silicato) que forma parte de una serie isomorfa que va desde la forsterita (silicato de magnesio) hasta la fayalita (silicato de hierro).

OMM (Organización Meteorológica Mundial): Creada en Washington en 1974. Es un organismo especializado de las Naciones Unidas. Está formada por 158 miembros. Programas y actividades en materia de medio ambiente: Programa Mundial del Clima, Programa sobre Educación, Investigación y Formación, y Programa sobre la Interacción del hombre y su Medio Ambiente.

OMS (Organismos Modificados Genéticamente): Organismos cuyo material genético ha sido diseñado o alterado deliberadamente.

OMS (Organización Mundial de la Salud): Organismo de las Organización de las Naciones Unidas (ONU) especializado en salud. Fue creado el 7 de abril de 1948, institución dependiente de la ONU. Tal y como establece su Constitución, el objetivo de la OMS es que todos los pueblos puedan gozar del grado máximo de salud que se pueda lograr.

Oncogén: Genes que regulan y controlan la transformación de las células normales en cancerígenas.

Onda sonora: Onda acústica comprendida en el margen de frecuencias audibles.

ONG: Ver *Organizaciones No Gubernamentales*.

Ópalo: Clase de cuarzo impuro. Se caracteriza por su brillo y astillabilidad. Se conoce también como sílice hidratada. Está compuesto por diminutas lepisferas formadas por capas sucesivas de cristobalita y tridimita, ambos elementos pertenecientes a formas de sílice.

OPL (Overband): Equipo con electroimán permanente integrado, que está indicado para realizar la separación magnética en la industria del reciclaje. Son equipos de recuperación construidos por un imán y un electroimán, según la potencia requerida, situado sobre una cinta transportadora. Las piezas de hierro y otros materiales magnéticos que pasen bajo el imán, mezclados con el material transportado, son atraídos por el separador del resto de materiales. La segregación se realiza rodeando el separador con la cinta transportadora de las dimensiones adecuadas, con la misión de retirar todas las piezas de hierro captadas y dejarlas caer sobre un punto determinado.

Optibag: Sistema lector óptico que selecciona por el criterio del color de la bolsa las diversas fracciones de entrada de residuos.

Órbita circumpolar: Orbita cuyo plano de rotación es casi perpendicular al plano del ecuador terrestre. Este tipo de órbitas es utilizado por satélites situados a alturas entre 600 y 2.000 km, cuyo movimiento en el cielo se sincroniza con el movimiento aparente del sol permitiendo observaciones de porciones de la superficie terrestre a una hora similar en tiempo universal, para cualquier punto de la tierra. De este tipo son los satélites Landsat, NOAA, o SPOT.

Órbita geoestacionaria: También llamada órbita geosincrónica. Para un satélite carente de impulso propio que se mueve en una órbita alrededor de la Tierra, la fuerza

centrífuga iguala a la atracción gravitatoria terrestre. Cuanto más lejana sea la órbita, mayor será el tiempo en completar una revolución, o periodo orbital, y menor será la velocidad. Existe una órbita (35.700 km. de altura) para la cual el periodo orbital vale 24 horas, es decir, el periodo de rotación de la Tierra. Esta órbita se llama geoestacionaria o geosincrónica, y un satélite que se encuentre en ella se moverá a la misma velocidad angular que la superficie terrestre, por lo que aparecerá inmóvil en el cielo. El plano de esta órbita es prácticamente similar al del ecuador.

Organatos-zinc: Compuestos orgánicos que poseen zinc y fósforo en la molécula. Suelen ser líquidos de carácter ácido. Se emplean como inhibidores.

Organizaciones No Gubernamentales (ONG): Organización sin ánimo de lucro cuyos objetivos son diversos: desde la vigilancia de un paraje, al cuidado de una comunidad en apuros.

Organoclorados: Compuestos químicos orgánicos. Están formados por un esqueleto de átomos de carbono en el cual algunos de los átomos de hidrógeno unidos al carbono, han sido reemplazados por átomos de cloro. Conforman un grupo de pesticidas artificiales desarrollados principalmente para controlar las poblaciones de insectos plaga. Su origen se remonta a la fabricación del DDT (diclorodifeniltricloroetano) en 1943, utilizado por muchas décadas en la lucha del control del mosquito Anopheles transmisor de la malaria.

Organometálicos: Combinaciones orgánicas en las que un metal está unido directamente al grupo o grupos alkilo o fenilo. En general son compuestos muy inestables.

Ortoimagen: Imagen fotográfica corregida geométricamente sobre la que se pueden realizar mediciones a la escala de la misma.

Orujo: Bebida alcohólica obtenida de la destilación del bagazo de la uva. Es una bebida muy popular en el noroeste de España, especialmente en Galicia, León y Cantabria

Orujo graso: Subproducto de las almazaras que se emplea para la extracción de aceite de orujo de aceituna.

OSHA: *Occupational Safety and Health Act*. Ley federal estadounidense que hace referencia a las condiciones ambientales y a la seguridad laboral. Las mismas iniciales indican la *Occupational Safety and Health Agency*, o sea la agencia estadounidense responsable de este tema; tiene funciones reguladoras y de inspección. Por extensión las iniciales indican todas las actividades empresariales orientadas a promocionar la seguridad laboral y las condiciones ambientales saludables en los lugares de trabajo.

Ósmosis: Difusión de un disolvente a través de una membrana semiimpermeable en el seno de una solución más concentrada con el objeto de igualar las concentraciones a uno y otro lado de la membrana.

Ósmosis inversa: Proceso industrial para eliminar iones y otras sustancias del agua, forzando la circulación del agua a través de una membrana semiimpermeable bajo una presión que supera a la presión osmótica, de tal forma que el flujo circula en dirección contraria a la del flujo osmótico normal. La ósmosis inversa se emplea en procesos de desalinización de agua y en descontaminación de aguas residuales.

Overband: Cinta trasportadora que lleva acoplado un electroimán y sirve para extraer la chatarra férrea de un caudal de basuras.

Óxico: Suelo extremadamente alterado propio de zonas tropicales y ecuatoriales. Formados por óxidos de hierro, aluminio, arcillas y minerales muy poco meteorizables.

Oxidación: Combinación del oxigeno con uno, o varios, de los elementos que químicamente pueden combinarse con él (a efectos prácticos, los mas relevantes son C, H, S y N).

Oxidación biológica: Metabolismo del oxígeno, de la respiración de la cadena respiratoria.

Oxidación húmeda: Oxidación de los contaminantes orgánicos por la acción del oxígeno a temperaturas elevadas (150-350 ℃) y presiones elevadas (10-220 bar).

Oxidación húmeda con peróxido (OHP): consiste en la oxidación de la materia orgánica empleando los radicales libres generados a partir del peróxido de hidrógeno. Es eficaz para la eliminación de los siguientes compuestos tóxicos: cloraminas, compuestos orgánicos policíclicos, antibióticos, cianuros complejos, naftalenos, antracenos, etc.

Oxidación-reducción: Tratamiento químico de depuración de aguas residuales que consiste en extraer electrones de los átomos o iones con la finalidad de degradar los contaminantes y hacer que sean más fáciles de eliminar.

Oxidante: Sustancia que contiene oxígeno que reacciona químicamente en el aire produciendo una nueva sustancia. Los oxidantes contribuyen de forma importante al *smog* fotoquímico.

Oxidante fotoquímico: Contaminantes del aire formados por la acción de la luz solar en óxidos de nitrógeno e hidrocarburos.

Óxido de nitrógeno (NO): Gas formado en los motores de combustión al realizarse esta reacción a alta temperatura y alta presión. Cambia a dióxido de nitrógeno en el aire y contribuye al *smog* fotoquímico.

Óxido nitroso: NO_2. Gas incoloro de olor y sabor dulce, soluble en el agua, alcohol, éter y benceno. Usado como anestésico suave; también denominado monóxido de nitrógeno y gas hilarante. Fuentes naturales: emisiones de bacterias desnitrificantes del suelo, océanos. También en muy poca proporción en combustibles. El mecanismo de eliminación es la fotodisociación en la estratosfera. Contaminante derivado del nitrógeno, con duración de 100 años o más en el aire.

Óxido Tributil Estañoso: producto orgánico incoloro, insoluble en agua y difícilmente lixiviable.

Óxidos de nitrógeno (NOx): Presente en todos los procesos de combustión, delimita uno de los grandes grupos de normas comunitarias. El Protocolo de Sofía de 1988 se refiere a los óxidos de nitrógeno, a su control de emisiones y sus flujos transfronterizos a gran distancia. El primer efecto contaminante que producen los óxidos de nitrógeno es llamado «*smog*» fotoquímico. Estos contaminantes gaseosos tienen una vida media de 2-5 días y contribuyen a la formación de ozono en la troposfera y a la deposición ácida. Fuentes naturales de NOx son los incendios forestales, los procesos anaeróbios del suelo y las descargas eléctricas.

Oxígeno activo: Oxígeno de reacción fácil que se presenta en forma atómica.

Oxígeno disuelto (OD): Oxígeno libre del agua. Es vital para los peces y otra vida acuática y para la prevención de olores. Tradicionalmente, el nivel de oxígeno disuelto se ha aceptado como el indicador más importante de la capacidad de un caudal de mantener vida acuática. Cantidad de oxígeno molecular (O_2) presente en el agua a una temperatura y presión determinadas.

Oxisols: Suelos tropicales y subtropicales intensamente erosionados, en los que incluyen la mayoría de suelos lateriáticos y bauxíticos.

Oxy-Fuel Meeting (oxicombustión): Sistema de combustión (generalmente de aire/gas) en donde se emplea oxígeno en lugar de aire. La cantidad de oxígeno suele ser variable.

Ozonización: Forma parte del proceso de desinfección en la potabilización del tratamiento de aguas gracias al potencial oxidante del ozono. Las aplicaciones de este gas en la depuración son: reducción de la DBQ y de la DQO, desinfección, aumento del oxígeno disuelto, reducción de color y olor, disminución de la turbidez; en el tratamiento de fangos, oxidación de fangos secundarios para la volatilización de compuestos orgánicos y oxidación parcial y destrucción de bacterias y otros organismos; tratamiento combinado con carbón activo, filtración, etc.; control de olores. La aplicación más utilizada es la del ozono como desinfectante. El ozono tiene muchas ventajas frente al cloro en el control de sabores y olores, pero este último tiene un bajo precio y es muy versátil.

Ozono: O_3. Descubierto en 1785 por M. van Marum es una forma alotrópica del oxígeno. Principal resultante y constituyente menor de las reacciones fotoquímicas de la atmósfera de la Tierra, se presenta con más densidad en las dos capas más bajas, la troposfera y la estratosfera. La mayor concentración se encuentra entre 20 km y 25 km por encima de la superficie de la Tierra. Producido por la acción del rayo sobre el oxígeno, así como cuando el aire o el oxígeno sufren una descarga eléctrica. Es un poderoso agente oxidante y se emplea en el acondicionamiento de aire para ventilación. Vida estimada 0,005 días. En la troposfera, el ozono es un oxidante químico y uno de los componentes más importantes del *smog* fotoquímico. Puede dañar seriamente el aparato respiratorio humano y es uno de los contaminantes más extendidos. En la troposfera, se produce mediante complejas reacciones químicas de óxidos de nitrógeno, hidrocarburos, reacciones producidas por la manipulación y procesamiento de productos derivados del petróleo y por la luz solar.

Ozonosfera: Capa de la atmósfera situada a una altura de entre 15 y 30 km donde el ozono se encuentra mayoritariamente. Absorbe las radiaciones ultravioletas del sol y actúa como reguladora del calor.

PAC: Política Agraria Común en la UE. Véase *Plan Mansholt*.

Pacto amazónico: Acuerdo para el desarrollo integral de la Amazonia, establecido en 1978 por Bolivia, Brasil, Colombia, Ecuador, Guyana, Perú, Surinam y Venezuela. Prevé la adopción de políticas comunes en materia de comunicaciones, terrestres y aéreas, desarrollo agrícola y valorización de recursos naturales; así como la libre circulación comercial por el río Amazonas y sus afluentes. Sus principales órganos son el Consejo de Cooperación Amazónico y la Reunión de Ministros de Asuntos Exteriores. Su sede está en Brasilia.

Paedogénico: Efectos causados sobre cualquier sustrato u organismo vivo por factores edáficos del suelo.

Paedología: Estudio de la morfología y distribución de los suelos.

PAH: (Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos) Es un grupo de componentes que consisten en moléculas que contienen dos o más anillos aromáticos de 6 carbonos fusionados. Existen más de 100 grupos de PAHs diferentes. Se consideran compuestos orgánicos persistentes (COPs), por lo que pueden permanecer en el medioambiente durante largos periodos de tiempo sin alterar sus propiedades tóxicas.

Pala: Elemento del aerogenerador que por efecto aerodinámico transforma la energía cinética del viento en energía mecánica en el eje del generador.

Palomina: Estiércol compuesto por deyecciones de palomas y cama.

PAN: Peroxiacetilnitrato. Proviene de fuentes naturales de la degradación del insopreno; bajo la actuación humana, de la degradación de los hidrocarburos. Emisión gaseosa a la atmósfera. Vida estimada 0,75 días.

Panespermia: Teoría que sustenta que la vida llegó a la Tierra procedente del espacio exterior.

Pantalla acústica: Elemento que se interpone entre una fuente sonora y el lugar que se quiere proteger acústicamente.

Pantanos: Terrenos fácilmente inundables y cenagosos dominados por vegetación herbácea. Cuando se inundan con agua de mar se llaman marismas. Por exten-

sión, se denomina con el mismo nombre a los depósitos de agua formados por grandes presas (embalses).

PAP (20): O cartón corrugado; es una estructura formada por un nervio central de papel ondulado (Papel *Onda*), reforzado externamente por dos capas de papel (Papeles *liners o tapas*) pegadas con adhesivo en las crestas de la onda. Es un material liviano, cuya resistencia se basa en el trabajo conjunto y vertical de estas tres láminas de papel. Para obtener su mayor resistencia, la onda del cartón corrugado tiene que trabajar en forma vertical. El cartón corrugado pierde su resistencia si la onda sufre aplastamientos o quebraduras producidos por fuerzas externas.

PAP (21): Cartón no corrugado, o sea cartón liso.

Papel: Producto industrial que consiste en rollos continuos de fibras vegetales adecuadas, libres de constituyentes no celulósicos y depositadas a partir de una suspensión acuosa. Las pulpas de madera, esparto y trapos son las primeras materias principales. Durante el proceso de manufactura, las fibras se reducen a la longitud requerida y se modifican sus propiedades físicas mediante tratamiento químico o mecánico. Véase *Pasta cruda*.

Papel de alto grado: Tipo de papel de alta calidad, normalmente de elevado gramaje y, a veces, satinado.

Papel de marca: Papel de tina de la medida del papel sellado.

Papel de overlay: Papel muy absorbente preparado para que se impregne con resina sintética, que se utiliza como capa exterior de una lámina decorativa y como elemento de protección de las capas interiores.

Papel estucado: Papel recubierto por una capa de estucado compuesta por pigmentos dispersos fijos con un adhesivo o aglutinado por diferentes aditivos como colorantes, modificadores de viscosidad, etc.

Papel kraft: Papel de color marrón oscuro muy resistente fabricado con pasta obtenida por el método de sulfato, que se utiliza para el embalaje.

Papel maché: Material fabricado con pasta de papel mezclada con gluten u otras sustancias endurecedoras, o con hojas de papel empastadas unas sobre otras.

Papel reciclado: Papel fabricado a partir de papel recuperado.

Parabenos: Éteres del ácido hidroxibenzoico, muy frecuentes en algunos cosméticos. Numerosos investigadores han encontrado parabenos en los tumores de mama y se ha descrito su capacidad para interferir en determinadas hormonas.

Parada biológica: Interrupción temporal de la actividad pesquera decretada por la autoridad competente con el designio de regenerar los recursos de los caladeros marinos.

Paradiclorobenzeno: Ingrediente presente en antipolillas y ambientadores. Se ha comprobado que puede causar cáncer.

Parafinas: Son hidrocarburos saturados de cadena abierta, pueden suponerse derivados del metano, por sustitución sucesiva de un H por un grupo metilo (CH_3). Emisiones biológicas aerobias. También presente en la evaporación de combustibles (coches, refinerías, gas natural).

Paramecio: Microorganismo ciliado, protozoo, comunes en agua y suelo

Paraquat: Herbicida orgánico de contacto, venenoso. Es absorbido rápidamente por las partículas del suelo, perdiendo su actividad. Su ingestión en grandes cantidades produce la muerte en los seres humanos.

Parásito: Organismo animal o vegetal que vive a costa de otro de distinta especie, alimentándose de sustancias y depauperándolo sin llegar a matarlo.

Parathion: Insecticida organofosforado, se descompone rápidamente después de su aplicación. Es muy venenoso para los mamíferos y aves.

Parque eólico; planta eólica; plataforma eólica: Instalación eólica que comprende varios aerogeneradores y su infraestructura eléctrica, de medición y control correspondiente. Aprovecha la energía del viento para producir electricidad y la vierte a la red general para su consumo.

Parque nacional: Áreas naturales relativamente amplias no alteradas de manera sensible por la actividad humana. Existen uno o varios ecosistemas no alterados materialmente por la explotación y ocupación humanas. Las especies de plantas y animales, los sitios geomorfológicos y el hábitat poseen un interés científico, educativo y recreativo especial o destacan por su gran belleza paisajística natural. Incluso pueden estar amenazadas de extinción en muchas de sus especies en las áreas mas hominizadas. Por definición deben estar abiertos al público. No se permite ningún tipo de extracción. Su primera manifestación se produjo en el Parque de Yellowstone (Wyoming-USA). En España el primero de los parques nacionales se estableció en 1912, en la montaña de Covadonga. En todo el mundo se han creado alrededor de 1.400 que cubren una superficie muy superior a los 300 millones de hectáreas. Según la clasificación de UICN de zonas protegidas, categoría II.

Parque natural: Espacio donde las transformaciones de la Naturaleza por el hombre han sido ya considerables y en el que se permiten actividades cinegéticas, de pesca, de carácter agropecuario y silvícola, siempre que no afecten a la conservación ordenada de los recursos renovables y de forma que no produzcan impacto ambiental. Son generalmente de menor superficie que los parques nacionales y normalmente los mantienen autoridades de carácter regional.

Partículas: Pueden ser sólidas (polvos) o líquidas (nieblas); según el tamaño serán partículas sedimentarias (mayor 15 μm) o partículas en suspensión (menor 15

µm), o humos (menor 1 µm). Se encuentran en el aire y/o en las emisiones contaminantes. Directiva 80/779, relativa a los valores guía de calidad atmosférica para el anhídrido sulfuroso y las partículas en suspensión, modificada por la Directiva 89/427. Las concentraciones son medidas en mg/m3, según el método de los humos negros de la OCDE, y el Anexo 1 fija los valores que no deben superar en todo caso el territorio de los Estados.

Partículas en suspensión: Total de partículas suspendidas en la atmósfera en forma sólida o gotas. La composición química depende de la localización y momento del año. Incluyen el polvo, las emisiones de procesos industriales, el humo de quemar madera y carbón de las emisiones de vehículos. Directiva 80/779 relativa a los valores límite y a los valores guía de la calidad atmosférica para el anhídrido sulfuroso y las partículas en suspensión.

Partículas, separación de: Método de depuración de gases utilizado para eliminar las partículas presentes en ellos. Los principales mecanismos son: por gravedad, a través del cual sedimentan las partículas sólidas y líquidas de tamaño elevado al reducir la velocidad de la corriente gaseosa que las envuelve; inercia; fuerza centrífuga; intercepción, mediante el cual se hace chocar la partícula con un obstáculo que la retenga; precipitación electrostática; difusión browniana y deposición ultrasónica.

Pascal: Unidad de presión, en el SI, equivalente a 1 newton por m^2. Equivale a 10 bar.

Pasivación: o también pasivado de los metales ferrosos y no ferrosos tiene por objetivo lograr cubrir el objeto con una película neutra que no favorezca las reacciones. Éste proceso es aplicado generalmente en baños de inmersión prácticamente en las etapas finales y posteriores a la manufactura. No todos los metales pueden ser sometidos a este proceso, incluyendo algunos aceros, de características inoxidables.

Pasta cruda: Pasta de papel que no ha sido sometida a ningún tratamiento especial destinado a aumentar su blancura.

Pasta Kraft: Variedad de pasta de papel química obtenida por cocción alcalina de la madera.

Pasta mecánica: Tipo de pasta de madera obtenida por medios enteramente mecánicos, hecha por graneado de madera bajo corriente de agua en una piedra giratoria de tal forma que las fibras de la madera se han separado pero permanece químicamente invariable; se utiliza principalmente para la manufactura de papel de periódicos.

Pasta química: Pasta de papel obtenida de la madera por tratamiento químico de vegetal (cocción) eliminando la mayoría de los componentes no fibrosos como la lignina.

Pasteurización: Tratamiento de higienización al que se someten ciertos alimentos, generalmente líquidos (leche, vino), que consiste en aumentar bruscamente la temperatura y mantenerla unos breves segundos.

Pastizal: Terreno con una masa vegetal herbácea apropiada para alimento del ganado que pasta *in situ*.

Pastone: Producto agrícola casi seco y desprovisto de gérmenes, después de haber sido sometidoa un proceso de higienización semejante a un autoclave.

Patógenos: Microorganismos que pueden causar enfermedades en otros organismos o en humanos, animales y plantas. Pueden ser bacterias, virus o parásitos que se encuentran en aguas de red de alcantarillado o en aguas residuales de granjas ganaderas o zonas rurales donde hay un número importante de animales domésticos o salvajes. Los pescados y mariscos contaminados por patógenos o la misma contaminación del agua puede causar serios problemas en la salud.

Paval: Escorias provenientes del proceso de reciclaje del aluminio. Su mayor componente es el óxido de aluminio.

Pavés: Bloque de vidrio enmoldado y grueso que sirve como baldosa para hacer paredes o pavimentos translúcidos.

PBDE: Polibromodifenil éteres ($C_{12}H_{10-x}Br_xO$). Clase de compuestos bromados de extenso uso como retardantes de llama en plásticos y espumas, incluidas las carcasas de plástico de equipos electrónicos. Los PBDEs son sustancias químicas medioambientalmente persistentes.

PCB: Véase *Bifenilos policlorados*.

PCDF: Ver *furanos.*

PCF: Véase *Pentaclorofenol*.

PCT: Policloroterfenilos o trifeniloso policlorados. Véase *Bifenilos policlorados*.

PE (Polietileno): Polietileno es químicamente el polímero más simple. Se representa con su unidad repetitiva $(CH_2\text{-}CH_2)n$. Por su alta producción mundial, es también el más barato, siendo uno de los plásticos más comunes. Es químicamente inerte. Se obtiene de la polimerización del etileno (de fórmula química es $CH_2=CH_2$ y llamado eteno por la IUPAC), del que deriva su nombre.

«Peak Oil»: También conocido como«Hubbert's peak». Se refiere a un acontecimiento histórico singular; el peak (pico) de la producción total de petróleo en el planeta. Después del «Peak Oil», según la Teoría de Hubbert Peak, el promedio de la producción del petróleo sobre la Tierra entrará en una declinación terminal.

Pectinas: Heteropolisacáridos que se encuentran en las láminas medias de la pared celular de las plantas. Están compuestas de ácido D-galacturónico, D-galactosa y L-ramnosa. Son muy abundantes en todo el reino vegetal. Debido a su gran capacidad para la formación de geles se utiliza para la elaboración de mermeladas y jaleas, así como en la estabilización de bebidas como emulsificantes de aceites etéreos y en la elaboración de helados.

Pedernal: Variedad del cuarzo. Con un golpe seco se exfolia en partes cortantes.

Peinado: Operación de eliminación de impurezas de las fibras cortas y de hacer paralelas las fibras largas o medianas de las cintas de fibras.

Pelágico: Relativo a las aguas lejos de la costa, más allá de la zona nerítica.

Penacho: Masa de aire sobresaturada de vapor de agua y que a menudo contiene contaminantes sólidos, líquidos o gaseosos, vertida a la atmósfera por una chimenea. Efluentes de las chimeneas formados por gases solos o junto con materia particulada. La forma del penacho depende de las condiciones metereológicas existentes en la atmósfera.

Penetración: Distancia máxima recorrida por una partícula alfa o beta antes de perder energía y ser detenida. En metalurgia y en geología se emplea la penetración del cono para determinar la dureza.

Penetrómetro: Instrumento usado para medir la resistencia a la penetración de un mineral (piedra, acero, material de construcción, etc.) por otro.

Pentabromodifenileter: Compuesto organobromado usado como retardante de llama. Próximamente está previsto incluirlo en el Convenio de Estocolmo, como sustancia tóxica a eliminar.

Pentaclorofenol: Sustancia peligrosa comprendida en la lista I de la Directiva 76/464, cuyos valores límite y objetivos de calidad para sus residuos figuran en la posterior Directiva 86/280, (concentración total de vertidos de PCF inferior a 2 µg/l, a partir de 1.1.88).

Percentil: En una población de datos estadísticos valor por debajo del cual se encuentra un porcentaje determinado del total de datos.

Percloretileno: Disolvente orgánico utilizado en la mayoría de limpiadores en seco que ha sido identificado como causante de cáncer en animales. Se trata de compuestos con halógenos contaminantes cuyas fuentes antropogénicas son disolventes, limpiando en seco y desengrasantes. Las Directivas Comunitarias 86/280 y la 88/347 incluyen los valores límite y los objetivos de calidad para residuos determinadas sustancias peligrosas entre las que se encuentra el percloretileno.

Percolación: Filtración de agua a capas profundas del terreno.

Percolar: Mover las aguas residuales por una masa muy porosa de piedra o plástico (filtro percolador) y que está recubierta por un cultivo bacteriano que biodegrada la materia orgánica.

Pérdida de carga: Pérdida de presión estática en la corriente de un fluido causada por rozamientos, obstáculos, cambios de dirección, etc.

Perdigones: Objetos de plomo de tamaño inferior a una lenteja que se emplea en la caza como proyectil, alojado en un cartucho.

Perfil de suelo: Corte transversal de un suelo que muestra capas horizontales homogéneas en composición y estructura, llamadas horizontes, situadas entre la superficie y la roca madre subyacente. Los horizontes típicos, desde la superficie, se denominan A, B y C.

Perfluooctosulfonato (PFOS): Producto surfactante y antiadherente. Próximamente está previsto incluirlo en el Convenio de Estocolmo, como sustancia tóxica a eliminar.

Pergamino: es un material hecho a partir de la piel de una res u otros animales, especialmente fabricado para poder escribir sobre él. La piel sigue un proceso de eliminación del vellón, adobado y estiramiento al final del cual se consiguen las láminas con las que se elabora un libro, una filacteria o los rollos que se conocían de la Antigüedad. El origen de su nombre es la ciudad de Pérgamo, donde existía una gran productividad de gran calidad de este material, pero realmente su existencia se remonta a 1.500 años antes de Cristo, es decir, mucho antes de que la ciudad de Pérgamo existiera.

Perifito: Alga bentónica que es arrastrada por la corriente de los ríos y vive en troncos a la deriva y plantas con raíces.

Peristasis: Influencia del medio en los seres vivos que en él habitan.

Perlita: Mineral silicatado que se expande al ser calentado a alta temperatura. Se usa para fabricar aislantes. Roca volcánica, vítrea, que contiene agua de cristalización en su molécula. // Punto eutectoide en el diagrama hierro-carbono, formado por ferrita y cementita secundaria.

Permacultura: Sistema integrado de agricultura perenne destinada a enriquecer y no destruir los ecosistemas locales y que intenta ser autosuficiente en cuanto a necesidades energéticas. La palabra «permacultura» proviene de los términos *Permanent Agriculture* y a pesar de ser un término que se utiliza mucho actualmente data de 1910 cuando Cyril Hopkins lo utilizó en su libro *Soil Fertility and Permanent Agriculture*.

Permafrost: Suelo helado de Alaska y Siberia que, al fundirse libera grandes cantidades de metano que contribuye decididamente al efecto invernadero.

Permanencia, periodo de: Periodo de tiempo que un compuesto, una vez introducido en el medio ambiente, tarda en desaparecer. Puede variar entre menos de un segundo y tiempo indefinido.

Permanganato potásico: Sal que se usa en el pretratamiento de aguas para la eliminación del manganeso en el agua. A veces se emplea como desinfectante.

Permeabilidad: Facilidad con que los gases y los líquidos penetran o pasan a través de un horizonte del suelo.

Permeámetro: Instrumento que se usa para medir la facilidad o dificultad de entrada de líquidos en un terreno.

Permutita: Véase *Zeolita.*

Peróxido de hidrógeno (H_2O_2). Compuesto químico con características de un líquido altamente polar, fuertemente enlazado con el hidrógeno tal como el agua, que por lo general se presenta como un líquido viscoso

e incoloro a temperatura ambiente con sabor amargo. Es conocido por ser un poderoso oxidante. También se conoce como agua oxigenada.

Persistente: Que permanece en el medio y es químicamente estable.

Pesticida: Sustancia o mezcla de sustancias destinadas a prevenir o controlar cualquier especie indeseable de plantas y animales. También puede destinarse al control del crecimiento vegetal como defoliando o como desecando.

Pesticidas organoclorados: Compuestos orgánicos que contienen en su molécula uno o varios átomos de cloro y que por su toxicidad son utilizados como pesticidas. Son sustancias químicamente estables. Como contaminantes tienden a circular a través de las redes tróficas y a acumularse en los organismos, incluido el hombre. Entre los pesticidas organoclorados se encuentra el conocido DDT (diclorodifeniltricloroetano).

Pesticidas organofosforados: Compuestos orgánicos que contienen fósforo en su molécula y que por su toxicidad son usados como insecticidas. A diferencia de los pesticidas organoclorados, se degradan fácilmente en el medio ambiente, por lo que se consideran contaminantes menos peligrosos.

PET: Polietileno teraftalado, tipo de materia prima plástica derivada del petróleo, correspondiendo su fórmula a la de un poliéster aromático. Su denominación técnica es Polietilén Tereftalato o Politereftalato de etileno. Empezó a ser utilizado como materia prima en fibras para la industria textil y la producción de films. En medicina, también significa Tomografía por Emisión de Positrones.

Petróleo: Aceite mineral hidrocarbonado no refinado que se extrae de yacimientos naturales. Consta principalmente de hidrocarburos alifáticos no saturados y en parte también de aromáticos. Para su empleo industrial se le refina y destila, con objeto de separar los diversos componentes y extraer el azufre de los gasóleos; modificada por la Directiva 87/219.

Petróleo crudo: Petróleo que se conserva en estado natural sin purificar o refinar.

Petrolquímico: Relativo o perteneciente a la petroquímica.

Petroquímica: Conjunto de técnicas que tienen por objeto la obtención de productos químicos por síntesis de productos derivados del petróleo.

Pez: Residuo no destilable del alquitrán. Es un producto pastoso en caliente y duro en frío que se usa para pavimentación e impermeabilización.

PG3-75: Pliego de Preescripciones Técnicas Generales para Obras y Puentes.

pH, valor: Es una magnitud física que indica la proporción de iones H+ en un medio. El pH del agua destilada es 7 y se acepta que es neutro. Cuando el pH es menor que 7 se dice que el medio es ácido. Cuando es mayor que 7, básico. El pH varía entre 0 y 14. Es un modo conveniente de expresar pequeñas diferencias en la acidez o alcalinidad de las soluciones casi neutras, diferencias que son de gran importancia en muchos procesos biológicos y electrolíticos.

PIB (Producto Interno Bruto): Valor total de la producción corriente de bienes y servicios finales dentro del territorio nacional durante un periodo de tiempo determinado, que generalmente es un trimestre o un año. Se considera una magnitud de flujo, porque contabiliza los bienes servicios producidos en el periodo de estudio.

Picado: Explosiones prematuras en los motores. Al incrementar el octanaje en las gasolinas se evitan estas explosiones.

Picnómetro: Instrumento para determinar la densidad de un medio tanto sólido como líquido.

Pieles: En la industria de la madera se denomina así a las primeras vueltas del desarrollo en la elaboración de chapas de madera.// Tela resultante del proceso de curtición de la piel de un animal.

Piezodiálisis: Diálisis producida por una diferencia de presiones.

Piezoelectricidad: Algunos cristales, como la turmalina, son polares. Cuando se les somete a presión un flujo de electrones se dirige hacia un «polo».

Piezómetro: Perforación que se realiza en un terreno para medir el nivel piezométrico y determinar las variaciones de nivel de las aguas subterráneas.

Pila botón: Pila pequeña, de forma circular y casi plana, usada en los relojes, calculadoras, etc. Es un tipo de pila muy contaminante por su alto contenido en mercurio.

Pila de combustible: Proceso inverso a la electrólisis. Se hace pasar el combustible (hidrógeno, metanol, etc.) a través de un electrodo que separa los electrones. Por otro lado se hace lo mismo con el oxígeno. No se trata de una combustión sino de la generación directa de electricidad. Por tanto el proceso tiene un rendimiento energético alto ya que no está sometido al ciclo de Carnot.

Pinch, análisis: (en inglés Pinch Analysis, o literalmente, análisis de «pellizco»), también llamado método pinch de diseño de procesos o tecnología pinch; es una metodología para optimizar la recuperación energética en un proceso químico industrial, minimizando la inversión de capital. Como fue conceptualizado inicialmente a finales de la década de 1970 por Linnhoff y Vredeveld, este análisis cuantifica los servicios que existen en una planta industrial (vapor, agua, y en general los servicios de calentamiento y enfriamiento), y los analiza frente a las necesidades de intercambio de calor de la planta.

Pintch-point: Diferencia entre la temperatura de los humos calientes en el evaporador y la del vapor saturado.

Pintura bituminosa: Pintura a base de asfalto en lugar de óxido de plomo o de zinc, que son las bases más usadas.

Pinturas: Suspensión de uno o varios sólidos en un líquido que al ser aplicado a una superficie, sea por evaporación con o sin oxidación, forma una capa firme adherida más o menos opaca. Los sólidos son pigmentos finamente divididos que imparten color y opacidad y son complementados por cargas; el líquido consiste en aceites, disolventes, resinas, soluciones acuosas coloidales, o dispersiones, etc., junto con otros pequeños ingredientes. Directiva 88/379 relativa a la clasificación, envasado y etiquetado de preparados peligrosos (disolventes y pinturas). En España el Reglamento de Clasificación, Envasado y Etiquetado de Pinturas, Barnices, Tintas de Imprenta, Colas y Productos Afines aprobados por el RD 149/89 del 3 de Febrero.

Pinturas al aceite: Pigmentos con o sin carga mezclados en aceite como vehículo o medio. Suelen añadirse algunos ingredientes auxiliares tales como disolvente, secantes, etc.

Piquel: Parte del proceso de curtición de pieles.

Piquera: Abertura practicada en algunas hornos de fusión para la sangría del metal //Usada en la producción de miel, es la abertura normalmente entre el piso y la cámara de cría, si es inferior. Por esta abertura ingresan las abejas a la colmena.

Piralenos: Nombre que reciben en España los PCB's (bifenilos policlorados), que básicamente corresponden a los aceites de transformador eléctrico. Véase *Askareles*.

Pirámide ecológica: Red trófica. Véase *Cadena de alimentación*.

Piretrum: Insecticida que se descompone rápidamente no dañando a las plantas.

Piridina: (Fórmula molecular C_5H_5N). Líquido incoloro de olor desagradable, similar al pescado. Pertenece a la familia de los compuestos aromáticos heterocíclicos y está estructuralmente relacionada con el benceno, siendo la única diferencia entre ellos el reemplazo de un grupo CH del anillo bencénico por un átomo de nitrógeno. Junto a sus compuestos relacionados, encuentran gran utilidad como disolventes, en análisis químicos, y como reactivos para la síntesis de fármacos, insecticidas, herbicidas, saborizantes, colorantes, adhesivos, pinturas, explosivos, desinfectantes y químicos para el caucho. Sin embargo, la piridina pura es una sustancia nociva si se la inhala, ingiere o si se absorbe por la piel. Reduce la fertilidad masculina y es considerada un carcinógeno. Los síntomas de exposición más comunes son: dolor de cabeza, tos, dificultad respiratoria, laringitis, náuseas y vómitos.

Pirita: Mineral del grupo de los sulfuros cuya fórmula química es FeS_2 (tiene un 53,4% de azufre y un 46,4% de hierro). Estructura compacta, de grano fino, globular y estalactítico. También llamada «el oro de los tontos» por su parecido a este metal. Insolubre en agua, y magnética por calentamiento.

Pirogénica: Véase *Pirólisis.*

Pirólisis: Tratamiento térmico de compuestos orgánicos consistente en someterlos a un calentamiento en ausencia de aire. El proceso rompe las largas cadenas moleculares iniciales y las transforma en otras mucho más ligeras, normalmente gaseosas y vapores, por lo general combustibles.

Pirosíntesis: Reacciones de condensación.

Piroxenos: Silicatos monoclínicos de hierro y de calcio. De brillo vítreo, color negro o verde negruzco son inalterables por el ácido clorhídrico. Se encuentran presentes en las rocas ígneas. Químicamente tienen un parecido a los anfíboles pero se diferencian de estos por tener un plano de exfoliación de 90º. Forman parte de éste grupo: la augita, la broncita, la enstadita y la hiperstena.

Pirquinero: es un término estrictamente criollo para denominar a los trabajadores de la minería. Se aplica al que trabaja sin leyes, sin seguros sociales, ni goza de garantías de ninguna clase.

Piscicultura: Arte de repoblar de peces los ríos y los estanques; de dirigir y fomentar la reproducción de los peces y mariscos.

Pitot, tubo de: Instrumento destinado a medir la velocidad de la corriente de un gas en el interior de un conducto.

Pizarras: Roca metamórfica homogénea formada por la compactación de arcillas. Se presenta generalmente en un color opaco azulado oscuro y dividida en lajas u hojas planas (típica exfoliación).

Placas tectónicas: Grandes unidades a modo de losas de litosfera, con un espesor del orden de 100 km que descansan sobre una capa más fluida, llamada astenosfera. La litosfera comprende la corteza terrestre (continental, oceánica o ambas) y parte del manto superior hasta la astenosfera.

P+L: Abreviación de Metodologías de Minimización y Producción más Limpia. Conjunto de técnicas para lograr una producción ambientalmente compatible**.** Es un concepto sistemático para la reducción del impacto ambiental de empresas a través de un uso más eficiente de los recursos. El programa PNUMA lo define como: «la aplicación continua de una estrategia ambiental preventiva integrada en procesos, productos y servicios a fin de aumentar la ecoeficiencia y reducir el riesgo para los humanos y el medio ambiente».

Plaga: Organismo (hongo, planta o animal) que mata, parásita, causa enfermedad o daña plantas de cultivo, animales de interés para el hombre o recursos almacenados como grano o madera.

Plagioclasa: Nombre genérico de los feldespatos sodocálcicos.

Plaguicida: Insecticida, herbicida, fungicida. Directiva Comunitaria 76/895 relativa a la fijación de niveles

máximos de residuos de plaguicidas en frutas y hortalizas. Modificada por sucesivas directivas.

Plan de emergencia: Documento que recoge la organización, planificación y coordinación de la acción que debe seguirse en caso de fuego, explosión y otro accidente en el que se desprendan productos químicos tóxicos, residuos peligrosos o materiales radioactivos que amenacen la salud humana o el medio ambiente.

Plan de minimización: Organización de medios humanos y técnicos de una empresa para sustituir la gestión clásica de residuos y emisiones por modificación en el sistema productivo o cambio de materias primas que propician una reducción en la generación de residuos y emisiones.

Plan director de gestión de residuos: Planificación de la gestión de residuos dentro de un ámbito territorial comprendiendo las distintas operaciones a que son sometidas los residuos desde su aparición hasta su disposición final.

Plan general de ordenación urbana: Constituye el instrumento global de ordenación urbanística del territorio municipal, aunque puede tener por ámbito geográfico varios municipios. Su función esencial consiste en establecer la clasificación del suelo, con su régimen jurídico correspondiente; así como definir los elementos fundamentales de la estructura general adoptada para la ordenación urbanística y el programa para su desarrollo (mediante planes parciales, normas subsidiarias y complementarias, estudios de detalle, etc.) y ejecución, con los plazos de su vigencia.

Plan Mansholt: Informe realizado en 1968 por Sicco Mansholt, entonces comisario de agricultura de la UE, que contenía una serie de propuestas para reformar la política agrícola común (PAC), mediante la modificación de sus estructuras productivas. Promueve la promoción de los jóvenes agricultores, retirada de los de mayor edad, fomento de la agricultura de grupo, mejora en la comercialización y reducción de la superficie agrícola total. Significó un intento de orientación de todo el sector agrario de la UE, frente a la política dominante polarizada en los precios, que tenía ~~y tiene como~~ como consecuencia la generación de grandes excedentes cuya financiación es sumamente costosa.

Plancton: Microorganismos que se forman en el mar y constituye el sustento básico de muchos peces.

Planta de cogeneración: Instalación en la cual, a partir de un combustible primario, como el gas natural, gasoil, energía renovable, se genera energía térmica, que se aprovecha posteriormente y energía eléctrica.

Planta de fertilizantes dano: Método de fabricación de abono a partir de los residuos orgánicos domésticos con aguas residuales mediante un proceso de fermentación y trituración que reduce las materias a estado granulado húmedo. El producto sirve para abonar suelos a causa de su elevado contenido en humus.

Planta de regasificación: Instalación donde recepciona el gas natural que se transporta en forma líquida. Una vez gasificado se almacena y se inyecta a los gasoductos.

Planta de transferencia: Centro de recepción de residuos, donde se agrupan y compactan para transportarlos a su destino final.

Plasma: Estado de la materia existente a temperaturas muy elevadas, caracterizado por la presencia de electrones libres e iones positivos libres.

Plásticos: Sustancias orgánicas, en su mayor parte productos de condensación o polimerización sintéticao semisintética (derivados de la caseína y de la celulosa) de derivados del petróleo, así como ciertas sustancias naturales (goma, laca, betún), largas cadenas de moléculas repetidas de hidrocarburos, tan estrechamente unidas que los hongos microscópicos y las bacterias que disuelven la madera y otras materias orgánicas, no pueden penetrar en ellos. Bajo el calor y la presión estas sustancias se convierten en pastosas y pueden sufrir entonces la acción de un molde. Poco peso y buenas propiedades eléctricas hacen que las sustancias plásticas tengan multitud de aplicaciones, a pesar de su relativamente escasa resistencia al calor, a la corrosión y a la intemperie.

Plásticos expandidos: Plásticos alveolares o espumados, por ejemplo el PVC, poliuretano, polietileno, etc., creados por la introducción de células o alvéolos de gas inerte (aire, dióxido de carbono, nitrógeno, hidrocarburos, etc.) en alguna etapa de su fabricación. Se usan como aislante del calor o como relleno entre paneles en la construcción debido a su baja densidad; también, debido a su blandura son utilizados en empaquetado y como goma espuma.

Plataforma continental: Fondos oceánicos de poca pendiente, con profundidades desde cero a doscientos metros, limitados por el litoral y el talud continental. Geológicamente son los bordes del continente situados bajo el mar. Suelen ser regiones marinas ricas en pesca.

Playa: Formación sedimentaria costera constituida por materiales detríticos. Es el resultado de procesos de transporte y depósito del oleaje, las corrientes y las mareas. En minería**:** acopio de materiales residuales (lodos).

Pleamar: Máxima altura alcanzada en la costa por el agua durante la marea alta.

Plexiglas: Marca Registrada de unos polímeros termoplásticos de poli (metil metacrilato). Se presenta en forma de hojas, perlas o gránulos.

Plomo: Pb; uno de los metales pesados por excelencia. Su acumulación en el organismo afecta al sistema nervioso central y llega a producir la muerte. La enfermedad típica se denomina saturnismo.

Plomo tetraetilo: Compuesto órgano-metálico tóxico que se usa en las gasolinas como antidetonante y aumentar

el octanaje de la gasolina en los motores encendidos por chispa. Como no interviene en la combustión es expulsado con los gases de escape. Entre 70 y 75% de este plomo se convierte en plomo inorgánico que es expelido a la atmósfera en forma de partículas muy finas. El plomo es venenoso para el cuerpo humano ya que ataca al sistema nervioso. Su fórmula química es $(\mathbf{CH_3}CH_2)_4\mathbf{Pb}$.

Pluma: Ver *penacho*.

Pluviometría: Medición de la cantidad de agua de lluvia que durante un periodo de tiempo determinado cae en un lugar. El total del agua se expresa en litros por metro cuadrado.

PMP: Punto de Marchitez Permanente. Contenido de agua de un suelo con que las plantas se marchitan y no llegan a recuperarse.

Pneumoconiosis: Enfermedad causada por la acumulación de polvo de carbón en los tejidos pulmonares. Se divide en dos categorías: Simple, en la mayoría de los casos el paciente puede seguir con su ritmo de vida. Complicada (fibrosis pulmonar masiva), la incapacidad dependerá de lo extendida que esté la enfermedad. Los síntomas pueden variar mucho de persona a persona, por lo general son, tos seca y dificultad para respirar.

PNRU: Es el Plan Nacional de Residuos Urbanos de España que el Ministerio de Medio Ambiente (Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental), para el desarrollo de las previsiones contenidas en las Leyes de Residuos y de Envases que corresponden a la Administración General del Estado, ha elaborado, en colaboración con las Comunidades Autónomas. Se publicó por Resolución el 13 de enero de 2000 (B.O.E. núm. 28, de 02-02-2000). Define objetivos en los siguientes temas: prevención, recogida selectiva, reutilización, recuperación y reciclaje, valorización de materia orgánica, valorización energética y eliminación.

PNUD: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.

PNUMA: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Creado en 1972, tras la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente celebrada en Estocolmo. Es un organismo especializado de la ONU, con sede en Nairobi (Kenia), que se ocupa de los temas medioambientales en el mundo. El PNUMA sirve como foro de discusión, pero carece de poderes ejecutivos y por lo reducido de sus presupuestos tiene una incidencia muy limitada.

Población de hecho: Está formada por los residentes presentes y transeúntes, del municipio o entidad considerada, en el momento de la operación estadística.

Poder calorífico: Cantidad de calor desprendida en la combustión completa por unidad de masa de un combustible.

Poder calorífico inferior (PCI): Es la cantidad de calor neto desprendida por un material por unidad de combustible, sin enfriar o condensar los productos de la combustión, con lo que se pierde el calor contenido en el vapor de agua formado en la combustión. El PCI es siempre menor que el PCS y es el valor que se tiene en cuenta al hablar de las cualidades energéticas de un producto.

Poder calorífico superior (PCS): Es la cantidad de calor desprendida por unidad de masa de combustible. Suele medirse mediante una bomba calorimétrica, donde se enfrían o condensan los productos de la combustión.

Podsols: Suelos podsolizados ~~su~~elo ácido ~~c~~on de pósitos de óxidos de hierro y un enriquecimiento orgánico en el horizonte B, de coloración gris ceniza en el horizonte A, y que están asociados a climas fríos y húmedos y de bosques o suelos recubiertos por vegetación de tipo matorral.

Pólder: Terreno ganado al mar o a lagunas pantanosas y convertido en tierra de cultivo o de pastos mediante la construcción de diques y el drenaje del agua por bombeo. (Típico de Países Bajos)

Polen: Polvillo que forman las partes reproductoras de las plantas y suele ser transportado por el aire.

Poliacrilamida: Gel utilizado en la electroforesis (separación de moléculas basado en su peso molecular y su carga eléctrica). Tiene la ventaja de ser transparente, insoluble en agua, fácil de preparar y de poder controlar el tamaño de los poros mediante la concentración.

Poliamida, membranas de: Material que se emplea, además del acetato de celulosa, para fabricar membranas de ósmosis inversa.

Polibromodifeniléter: Retardante de llama en ropa y ordenadores, televisores, pijamas para niños y tapicerías de cines, entre otras muchas cosas, han sido fabricados con unas sustancias llamadas PBDE (polibromodifeniléteres).

Policlorobifenilos: PCB's. Compuestos orgánicos aromáticos que incorporan átomos de cloro. Son contaminantes que pueden acumularse en las cadenas tróficas.

Policloroeterfenilos: PCT's. Compuestos orgánicos aromáticos que incorporan átomos de cloro. Son contaminantes que pueden acumularse en las cadenas tróficas.

Polielectrolito: Sustancia utilizada para agrupar (cohesión de partícula pequeña) las partículas sólidas en el agua.

Poliestireno (PS): Plástico fabricado a partir del estireno. Es rígido, duro y frágil. Tiene buenas propiedades ópticas, es transmisor de luz, tiene estabilidad dimensional, baja absorción de agua y conductividad térmica reducida.

Polietilentereftalato (PET): Plástico muy resistente al impacto, es atravesado por la luz y muy resistente a los agentes químicos y al paso de agua y gases. Se refuerza con fibra, vidrio, cargas minerales y otros agentes. Es un material con óptimas propiedades pero coste energético elevado.

Polifosfato: Compuestos, sales del ácido fosfórico, que se emplean en el tratamiento de agua para inhibir la formación de gérmenes cristalinos. Es decir, son desfloculantes.

Polímero: Compuesto químico, natural o sintético, formado por unidades estructurales repetidas. La dimensión molecular del polímero permite determinar las propiedades mecánicas del material plástico, extendiéndose desde unos cientos de unidades básicas hasta cientos de miles. Macromoléculas orgánicas, conseguidas por la acción de floculantes.

Polimorfismo: Formas cristalográficas diferentes que responden a una misma composición química.

Polines: pieza que forma parte de una cinta transportadora, la que hace posible que ésta ruede.

Polioles: Cadenas complejas de azúcares.

Pólipos: Puentes grúas con ambos brazos. Formaciones o aglomeraciones de células en un punto determinado.

Poliscáridos: Compuestos formados por la unión de muchos monosacáridos. Pertenecen al grupo de los glúcidos y cumplen funciones tanto de reserva energética como estructurales. Los polisacáridos son polímeros cuyos monómeros son los monosacáridos, que se unen repetitivamente mediante enlaces glucosídicos. Estos compuestos llegan a tener un peso molecular muy elevado, que depende del número de residuos o unidades de monosacáridos que participen en su estructura

Poliuretano: Polímero termoplástico, que se obtiene por reacción de condensación de un poliisocianato y un material que contenga hidroxilo tal como un políol o un aceite secante. Se emplea en la fabricación de muchas pinturas sintéticas de alto rendimiento, como las pinturas de los coches y las pinturas de suelo, en espumas y en materiales elásticos (elastómetros). Es un producto que, en combustión, genera compuestos cianhídricos muy peligrosos para la salud humana.

Polvo: Conjunto de partículas sólidas y secas que se obtienen por trituración de unidades más grandes, por combustión o por precipitación mediante reacción química.

Porexpan: O poliestireno expandido. Material plástico espumado, derivado del poliestireno y utilizado en el sector del envase. Se le conoce también en su versión más coloquial como telgopor, porespan, poliexpan o corcho blanco. Su cualidad más destacada es su higiene al no constituir sustrato nutritivo para microorganismos. Es decir, no se pudre, no se enmohece ni se descompone lo que lo convierte en un material idóneo para la venta de productos frescos.

Poroton (S12): Ladrillo aligerado, cerámico, de baja densidad de tecnología alemana, con unas características especiales como materiales aislantes térmicos y acústicos.

Portlandita: Hidróxido de calcio pero que se conoce con ese nombre en la industria de fabricación de cemento. Es un compuesto del material fraguado. Su fórmula genérica es ($Ca(OH)_2$).

Poseedor: El productor de los residuos o la persona física o jurídica que los tenga en posesión y no tenga la condición de gestor de residuos. Véase *Productor*.

Posidonea: Conocida como Posidónea Oceánica es una planta marina que forma praderas, denominadas «algueros», sobre fondo arenoso Mediterráneo. Se pueden encontrar cerca de la superficie, en lugares calmados, hasta 30 ó 40 metros de profundidad. Tiene un papel clave en la dinámica de la zona litoral.

Postclausura, tiempo de: Periodo de tiempo que debe realizarse el seguimiento a una instalación de tratamiento, almacenamiento o eliminación de residuos después de haber sido clausurada. En el caso de la Unión Europea se considera que debe ser de 30 años.

Postconsumo: es el concepto utilizado para nombrar al nuevo uso que se le da a un material que ha sido recuperado de los residuos.

Potabilización: Tratamiento que convierte el agua en apta para el consumo humano y la elaboración de alimentos.

Potasa: K(OH). Hidróxido potásico. Compuesto muy alcalino.

Potencia nominal: La máxima potencia producida por el generador en condiciones de diseño.

Potencial de reciclaje o de recuperación: Posibilidad de someter un flujo de subproductos o una emisión a procesos de reciclaje o recuperación.

Potencial hidráulico: Altura que tiene el agua en un punto del acuífero respecto a un plano de referencia.

Potencial redox: Potencial de óxido-reducción. Es la diferencia de potencial eléctrico del electrodo de referencia y otro de medida sumergido en un sistema de óxido-reducción. Las sustancias con potenciales redox más negativos, tienen mayor tendencia a ceder electrones que las sustancias con potenciales redox menos negativos o positivos. El potencial redox se mide en voltios.

Potencial reductor: Presión electrónica existente en un líquido, medido en voltios.

Potencial zeta: Potencial situado en el entorno de la capa difusa de una partícula coloidal. También llamado electrocinético. Diferencia De potencial entre la superficie que separa las partes fija y móvil, por una parte, y el seno del líquido, por otra. Su magnitud da idea de la probabilidad de adhesión.

Pozo ciego: Cavidad subterránea destinada a recibir aguas residuales para infiltrarlas en su entorno.

PP (Polipropileno): Plástico fabricado a partir del propileno. Tiene gran demanda en el mercado del automóvil. Su única limitación es la fotodegradabilidad, por lo que es aditivado con estabilizantes a la luz.

PPA: Índices normalizados del Producto Interior Bruto *per cápita* tomando como factor de conversión la pariedad de poder adquisitivo en lugar del cambio oficial.

PPB: Partes por billón (en EE UU, el billón equivale a 1.000 millones). Indica una millonésima parte del volumen del peso. Es muy utilizada en Estados Unidos.

PPM: Partes por millón. Una millonésima parte del volumen o del peso. Terminología para expresar pequeñas concentraciones de contaminantes en agua, aire, suelo, tejidos humanos, alimentos u otros productos. Junto con la ppb y los microgramos por metro cúbico de aire (m^3), es la unidad más utilizada en la química atmosférica para cuantificar el contaminante contenido en un volumen de aire.

Praderas de fanerógamas: Fondos marinos en los que crecen alguna de las tres únicas especies de fanerógamas marinas (Posidonia oceánica, Zostera marina y *Lymodocea nodosa*). Estas plantas colonizan fondos fangosos o arenosos, formando praderas que dan asiento a numerosas especies de animales marinos.

Praderas de Posidonia: Ver *praderas de fanerógamas*.

Precipitación: Aporte de agua a una determinada cuenca a través de los agentes atmosféricos, lluvia, nieve o granizo.

Precipitación química: Procedimiento para la deposición de materiales sólidos, en aguas residuales de alcantarilla, por adición de productos químicos (tales como lino o alumbre férrico), antes de admitir tales aguas en depósitos de sedimentación.

Precipitador electroestático: Véase *Filtro electrostático*.

Precipitador: Instalación de control atmosférico que recoge partículas de una emisión.

Precursor: En terminología fotoquímica, sustancias como los compuestos orgánicos volátiles que preceden a un oxidante. Reaccionan con la luz solar formando ozono y otros oxidantes fotoquímicos.

Prélevement: Voz francesa muy difundida en la Comunidad Europea, y oficialmente traducido en el Tratado de Adhesión de España a la UE por «exaccioness variables». Grava las diferencias entre los precios del mercado mundial y los precios de entrada en la Comunidad, para garantizar a la agricultura comunitaria los niveles de renta a que se refiere el Art. 39 del Tratado de Roma. Los ingresos por *prélevements* se transfieren por cada uno de los quince estados miembros a la UE.

PREPARE: Abreviación de «Preventive Environmental Protection Approaches in Europe». Este proyecto es un Forum multidisciplinario que promueve proyectos en varios países de Europa, aplicando la metodología de la producción más limpia.

Presa: Obra realizada en un curso de agua, y que sirve para contener el agua embalsándola y regulando las crecidas, para almacenar una cantidad de ella destinada a riego, producción de energía eléctrica y otros usos. La construcción de una presa, supone la creación de un desnivel importante entre las cotas de agua, anterior y posterior a la misma.

Preservación: Mantenimiento de cualquier cosa en su estado actual.

Preservante: Producto químico utilizado para alargar la vida útil de determiados materiales como maderas y metales.

Presión acústica: Magnitud utilizada para evaluar la perturbación del estado de equilibrio del medio donde se propaga una onda sonora, que consiste en la variación de presión por encima y por debajo de la presión atmosférica.

Presión barométrica: Presión atmosférica medida con el barómetro. La presión atmosférica en un lugar es el peso de la columna de aire sobre la unidad de superficie. Se mide en milibares o en milímetros de mercurio. 1 mm Hg equivale a 1,33 mb.

Pretratamientos: Conjunto de tratamientos en el proceso de depuración de aguas que buscan acondicionar el agua residual, eliminando elementos voluminosos como: plásticos, trapos, botellas, maderas, para facilitar los tratamientos posteriores, y preservar la instalación de erosiones y taponamientos. Incluyen equipos tales como rejas, tamices, desarenadores y desengrasadores. El término también se puede extender a otro tipo de residuos.

PRI (Periodo de Retorno de la Inversión): Corresponde al número de periodos requeridos para recuperar el coste de la inversión. No considera el valor de dinero en el tiempo por ello se usa como indicador complemento a TIR (Tasa Interna de Retorno) y al VAN (Valor Actual Neto).

Principio «de la cuna a la tumba»: Principio según el cual sólo se consideran productos ecológicos aquellos que son respetuosos con el medio ambiente desde el momento en que son concebidos hasta el momento en que se convierten en residuos y se gestionan como tales.

Principio alara: Es un principio general que fija los niveles máximos, los límites de descarga en la atmósfera de radiaciones radioactivas. Todas las exposiciones deben ser mantenidas a un nivel tan débil como razonablemente sea posible.

Principio contaminador-pagador: También llamado principio de responsabilización. Establece que todo aquel que contribuye a deteriorar el medio ambiente ha de cargar con los costes que exige la descontaminación para restablecer el estado original.

Prión: Proteína infecciosa que constituye un agente trasnmisible no convencional causante de la enfermedad de las vacas locas conocida como EEB.

PRISMA: metodología desarrollada en Holanda (1988) para facilitar la implementación de *Producción más Limpia* en las empresas.

PRO-ALCOOL: Pograma implementado en Brasil para la utilización de alcohol (etanol) como combustible. El alcohol es extraído de la caña de azúcar. Se puso en

marcha en 1975 y desde entonces se han producido unos 180.000 millones de litros de bioetanol, que actualmente reemplazan aproximadamente a unos a 200.000 barriles diarios de gasolina.

Procariota: Célula primitiva sin núcleo.

Proceso aerobio: Proceso químico o bioquímico en el que es absolutamente necesaria la presencia de aire.

Proceso Bayer: Proceso de refinamiento mediante el cual se obtiene la alúmina contenida en la bauxita (material en bruto: alúminas hidratadas ($Al2O_3$ *n* H_2O, donde *n* = 1,2,3) con algunas impurezas de hierro, titánio y silicio) . Este proceso está basado en la reacción reversible del hidróxido de aluminio con hidróxido de sodio. La bauxita es lavada, pulverizada y disuelta en sosa cáustica (hidróxido de sodio) a alta presión y temperatura. Durante el proceso de purificación, la alúmina mineral reacciona para producir una solución para formar Na Al O_2, al tiempo que las impurezas, por entonces solubles, son sedimentadas. Paralelamente, la solución supersaturada de Na Al O_2, es sedimentada con cristales intersticiales para iniciar la precipitación de hidróxido de aluminio puro. Este se calcina a, aproximadamente, 1.400 ℃ para obtener alúmina alfa. El resultado es aglomerado de alúmina duro y de baja densidad. La desaglomeración extensiva y la reducción de tamaño de partículas a micro tamaños son los procesos finales mediante los cuales se obtienen los polvos para ser utilizados como polvo de alúmina clasificado por el tamaño de partículas y el contenido de impurezas de óxido de sodio.

Proceso ecológico: Una acción ~~o~~ serie de acciones— continuada, regida o fuertemente influida por uno o más ecosistemas.

Procesos de oxidación avanzada (POA's): Usan oxidantes (químicos) para reducir los niveles DQO/DBO, y para separar los componentes orgánicos de los componentes inorgánicos oxidables. Son particularmente apropiados para aguas residuales que contienen recalcitrantes, tóxicos o materiales no-biodegradables.

Procesos de pretratamiento: Procesos utilizados para reducir, eliminar o alterar la naturaleza de los residuos contaminantes del agua de fuentes no domésticas antes de ser vertidos en el sistema de alcantarillado público para su posterior tratamiento.

Producción limpia: Producción industrial que minimiza el impacto ambiental por medio de la gestión responsable de los recursos, el uso y diseño adecuados del producto, la reducción y gestión de los residuos, el uso de la tecnología limpia, etc.

Producto de solubilidad: Es una constante que indica el equilibrio entre el compuesto y los iones. El valor de K (producto de solubilidad) es tanto mayor cuanto menos soluble es un cuerpo.

Producto ecológico: Producto con un ciclo de vida de mínimo impacto ambiental.

Producto peligroso: Producto utilizado o elaborado en un proceso productivo que puede ser explosivo, combustible, inflamable, irritante, nocivo, tóxico, cancerígeno, corrosivo, infeccioso, teratogénico y/o mutagénico.

Producto petrolífero: Los que se obtienen de la destilación del crudo de petróleo en las refinerías. Los más conocidos son las gasolinas y el gasóleo. También lo son el butano, el propano o los asfaltos.

Productor: Cualquier persona, física o jurídica, la actividad de la cual produce residuos como productor inicial así como cualquier persona que efectúe operaciones de tratamiento previo, de mezcla o de otro tipo que ocasionen un cambio de naturaleza o de composición de estos residuos. // Ecol. Es un ecosistema, organismos autótrofos, en gran parte plantas verdes, que son capaces de producir sustancias orgánicas complejas a partir de compuestos inorgánicos simples. Véase *Consumidores, degradadores*.

Programa de acción para el medio ambiente: A partir de 1973, el Consejo de las Comunidades Europeas dispuso el establecimiento del «Programa de Acción en Materia de Medio Ambiente». El primero (1973-76) fundamenta su preocupación en la lucha contra la contaminación. Este programa fue prorrogado y completado para el periodo 1977-81. El tercero, para los años comprendidos entre 1982 y 1986, es un proyecto global, que considera que la política de medio ambiente es estructural, y no debe ser modificada por hechos coyunturales. El cuarto Programa favorece la integración política medioambiental como condición de desarrollo económico y promueve la educación ambiental. Crea la Agencia Europea de Medio Ambiente. Actualmente está en vigor el quinto Programa, iniciado en 1992 y pensado para siete años.

Programa de actuación: Se trata de uno de los documentos que en la normativa española integran los planes generales municipales de ordenación urbana. Recogen los objetivos, directrices y estrategia del desarrollo a largo plazo para todo el territorio comprendido en su ámbito.

Programa MAB: Programa *Man and Biosphere*, creado por la UNESCO en 1971. Es un programa científico internacional de investigación, formación, divulgación y demostración que se lleva a cabo en más de 100 países y que tiene por objetivo proporcionar los conocimientos científicos y el personal cualificado necesarios para resolver los problemas que genera el manejo de los ecosistemas de la biosfera.

Programa medioambiental: Proporciona la descripción de los objetivos y del programa de actividades específicas de la empresa en relación con la mejora de la protección del medio ambiente en un centro determinado, incluyendo información general sobre las medidas adoptadas para alcanzar dichos objetivos y los plazos

fijados para la aplicación de dichas medidas. Reglamento DOCE 30.04.93.

PROGROC (Programa de gestión de residuos de la construcción en Cataluña): Programa cuya nueva etapa de planificación cubre el periodo comprendido entre los años 2001 y 2006. Esta nueva etapa tiene como objetivo estratégico alcanzar un alto nivel de gestión medioambiental de los residuos de la construcción, cumpliendo los objetivos de la Comisión Europea en materia de reciclaje y seguridad ambiental de las instalaciones, de forma que en cualquier proyecto en el que se generen residuos de la construcción se tengan en cuenta los costes derivados de una gestión ambientalmente sostenible. Estos objetivos deben conseguirse mediante una serie de actuaciones agrupadas en los siguientes seis grandes ejes de actuación: Prevención, valorización, disposición de los desperdicios en depósitos controlados, despliegue del modelo de gestión, criterios para el despliegue de las infraestructuras y actividades de divulgación y formación.

Propulsor: Sustancia gaseosa licuada bajo presión, utilizada para expeler una sustancia contenida en un recipiente.

Protección catódica: Reducción del potencial de electrodo, por debajo de –0,58 V, el acero adquiere inmunidad, propiedad que se utiliza para la preservación de tuberías enterradas o equipos en contacto con agua salada.

Proteínas: Cualquiera de las numerosas sustancias que forman parte de la materia fundamental de las células y de las sustancias vegetales y animales. Son moléculas formadas por una gran cantidad de aminoácidos. Generalmente se disuelven en agua o en soluciones acuosas de sales minerales diluidas. Entre ellas figuran las enzimas, ciertas hormonas y la albúmina.

Protocolo de Kioto: Instrumento internacional acordado en 1997 dentro del Convenio Marco de la ONU (UNFCC) que tiene por objeto reducir las emisiones de seis gases provocadores de calentamiento global, en un procentaje aproximado de un 5% dentro del periodo que va desde el año 2008 al 2012, en comparación a las emisiones al año 1990. El acuerdo ha entrado en vigor sólo después de que 55 naciones que suman el 55% de las emisiones de gases de efecto invernadero lo ha ratificado. Este es el único mecanismo internacional para empezar a hacer frente al cambio climático y minimizar sus impactos.

Protocolo de Montreal: Prevé una reducción escalonada en el nivel de emisión de CFC's de 1.7.93 sea anualmente el 80% del denominado «nivel calculado de consumo» de 1986, y el 50% desde 1.7.98. Clasifica las sustancias controladas según el «potencial de agotamiento de la capa de ozono»; grupo I $CFCl_3$, CFCl, C_2FCl, C_2FCl, C_2FCl, y grupo II CF_2BrCl, CF_3Cl, C_2FBr, y permite la prohibición o restricción a la importación de productos elaborados con estas sustancias.

Protozoo: Animales, habitualmente microscópicos, cuyo cuerpo está formado por una sola célula o por una colonia de células iguales entre sí.

Psicrófilo: Conjunto de microorganismos que actúan, en los procesos de digestión anaerobia, entre 5 y 10 ℃.

Psicrómetro: Higrómetro que consta de un termómetro seco y un termómetro húmedo.

Psoralens: Cancerígenos naturales.

Pulpa: Mezcla húmeda de fibras a partir de la cual se fabrica el papel. También se aplica a otros materiales y procesos, como frutas o medicinas.

Pulpeado: Proceso mediante el cual la madera se convierte en una masa fibrosa, en donde se rompen las uniones de la estructura de la madera. El proceso se puede llevar a cabo mecánicamente, térmicamente, químicamente o por combinación de estos tratamientos.

Pulper: Gran cuba, dispositivo semejante a una gran batidora, utilizado en el proceso de fabricación y reciclaje de papel. Normalmente se trata de un depósito (a veces es un tromel) y está ubicado a nivel inferior del suelo, en cuyo interior se encuentra una gran hélice. Al añadir la pasta de papel comienza el proceso de disgregación de fibras primero por el impacto al caer los fardos, después por el rozamiento de la hélice con la pasta y finalmente por el rozamiento de las mismas fibras entre sí. Esta acción genera calor que ayuda a la dispersión.

Pultrusión: Procedimiento de fabricación de perfiles de plástico reforzado con el cual se obtiene una gran resistencia unidireccional, mediante la tracción de hilos continuos, previamente impregnados de resina, a través de una hilera caliente.

Punto de rocío: Temperatura a la cual tiene que llegar el aire húmedo (u otros vapores condensables), evolucionando a presión y proporción de mezcla constantes, para conseguir la saturación con respecto al agua.

Punto limpio: Centro de aportación y almacenaje selectivo de residuos municipales que no son objeto de recogida domiciliaria con la finalidad de facilitar su valorización o gestión correcta. Estas instalaciones son de uso de particulares y pequeños comercios de acuerdo con las ordenanzas municipales.

Punto verde: Distintivo creado en Alemania en Febrero de 1991 que identifica los envases reciclables. El fabricante paga por cada envase que dispone de esta etiqueta.

Punzonamiento: Deformación permanente que experimenta un terreno en recibir la acción de una carga sobre una pequeña superficie, cuya carga excede su capacidad de distribuir gradualmente la compresión sobre superficies ideales más grandes cuanto más alejadas están del punto que recibe la carga.

Purificadores de gas: Instalaciones o dispositivos que separan del gas principal aquellos compuestos que lo

contaminan. La parte o departamento de las fábricas de gas en que se desprende el SH_2 por el método de hacerlo pasar por varias capas de óxido de hierro hidratado.

Purín: Heces líquidas de animales.

Purinas, grupo de las: Grupo de diureidos cíclicos derivados de una molécula de un ácido dibásico y de dos moléculas de urea. El miembro más sencillo de éste grupo es la purina. Otros miembros del grupo de las purinas son la adenina, cafeína, guanina, hipoxantina, tobromina, trofilina y xantina.

Puzolanas: El Código ASTM (1992), las define como «materiales silíceos o alumino-silíceos quienes por sí solos poseen poco o ningún valor cementante, pero cuando se han dividido finamente y están en presencia de agua reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes». Véase *Trass.*

PVC rígido: PVC en su forma no plástica usado como anticorrosivo, sobre todo en conducciones de sustancias químicas y aguas residuales.

PVC: Plástico fabricado a partir del nomómero de cloruro de vinilo. Plástico de gran resistencia que desprende cloruro de hidrógeno al ser quemado. Se utiliza en cables eléctricos como aislante y en conducciones. Resiste el ataque de ácidos y bases. Es inestable al calor y a los rayos ultravioletas.

Pyme: Abreviatura utilizada para denominar a la Pequeña y mediana empresa.

Pyrex: Vidrio con elevado porcentaje de boro, lo que le confiere una gran resistencia al choque térmico.

Quark: Ver *bosón.*

Quebrada: Barranco por donde circula el agua en épocas de lluvia. Véase *Torrent*e.

Quelante: Propiedad que presentan algunos aniones consistente en «secuestrar» iones metálicos en forma de quelatos.

Quelato: Tipo cíclico de estructura química que da lugar a compuestos excepcionalmente estables.

Queluviación: Proceso que consiste en el transporte del hierro, aluminio y humus de la parte superior del suelo a otro lugar.

Quema de rastrojos: Práctica utilizada tradicionalmente para recuperar de forma parcial un terreno ocupado por rastrojos. Las cenizas dejan parte de elementos minerales en el suelo pero destruyen la vida animal por lo que el daño es muchas veces mayor que el beneficio.

Queroseno: Querosina, aceite de parafina. Mezcla de hidrocarburos obtenidos por destilación del petróleo. Se utilizó como combustible para el alumbrado, calefacción y algunos motores.

Quilate: Medida de referencia para piedras preciosas. Un quilate equivale a 200 miligramos.

Químicos orgánicos sintéticos, productos: Productos orgánicos fabricados por el hombre. Algunos son volátiles mientras que otros tienden a disolverse en agua más que a evaporarse.

Quimioesterilizadores: Sustancias químicas que disminuyen la capacidad reproductiva de los insectos e incluso la eliminan. Se utiliza como pesticidas. Por ejemplo el afolato, que inhibe el desarrollo de los insectos.

Quimiosintesis: Proceso de síntesis cuyo motor es la temperatura que, por ejemplo, permite la vida a grandes profundidades oceánicas. En este caso, el calor procede de las chimeneas del fondo del mar.

Quimisorción: Proceso usado en el tratamiento de residuos que consiste en una combinación de adsorción (proceso físico) con reacción química.

Quinoleína: (o también quinolína). Líquido incoloro higroscópico compuesto de nitrógeno, que se encuentra en el alquitrán de hulla y se obtiene a partir de éste, pero más frecuentemente por síntesis. Es muy refrigerente y se oscurece con el tiempo. Se utiliza en medicina como conservante de muestras anatómicas. Su fórmula genérica es: C_9H_7N.

Quinonas: Grupo de pigmentos naturales, obtenidos fundamentalmente de plantas superiores, pero también localizables en hongos, líquenes, insectos y animales marinos. Juegan un importante papel en los procesos de oxidación-reducción de estos organismos.

Quiral: química quiral, procesos en los que se utilizan biocatalizadores específicos para cada tipo de estereoisómero. Estos catalizadores son costosos, pero conllevan un rendimiento positivo tanto para las empresas como para el medio ambiente.

RAA (Residuos de Alta Actividad): Residuos que emiten altas dosis de radiación. Están formados, fundamentalmente, por los restos que quedan de las pastillas del uranio que se usa como combustible en las centrales nucleares y otras sustancias que están en el reactor y por residuos de la fabricación de armas atómicas. También algunas sustancias que quedan en el proceso minero de purificación del uranio son incluidas en este grupo. Entre estos se encuentran sustancias como el plutonio 239 (vida media de 24.400 años), el neptuno 237 (vida media de 2. 130.000 años) y el plutonio 240 (vida media de 6.600 años). Se entiende que el almacenamiento de este tipo de residuos debe ser garantizado por decenas de miles de años hasta que la radiactividad baje lo suficiente como para que dejen de ser peligrosos.

Raberon: Residuo forestal.

RAD: Abreviación inglesa para Radiation Absorved Dose. Unidad estándar de absorción de dosis radioactiva igual a 100 erg. por gramo.

Rad: Unidad de dosis absorbida de radiaciones ionizantes, equivalente a la centésima parte de un gray.

Radiación: Emisión y propagación de energía bajo la forma de ondas o de partículas subatómicas. Puede diferenciarse la radiación de ondas (electromagnética), lu-

minosa, acústica, de radio, de rayos X (gamma) y corpuscular (alfa y beta).

Radiación difusa: Parte de la radiación solar incidente que procede de todas las direcciones después de su difusión en la atmósfera y eventuales reflexiones en la superficie terrestre.

Radiación directa: Parte de la radiación solar incidente que no sufre ningún cambio de dirección.

Radiación infrarroja: Radiación invisible electromagnética de longitud de onda superior al intervalo correspondiente a la luz visible.

Radiación ionizada: Radiación que puede extraer electrones de los átomos. Son las radiaciones alfa, beta y gamma.

Radiación solar: Cantidad de energía procedente del sol que se recibe en una superficie y tiempo determinados.

Radiación ultravioleta: Radiación invisible electromagnética de longitud de onda inferior al intervalo correspondiente a la luz visible. Esta parte de la radiación solar, interviene en los procesos de deterioro de las superficies expuestas al sol.

Radiación, transmisión de calor por: Radiación electromagnética que transmite calor desde un objeto a otro, sin necesidad de un medio material entre ambos, y sin calentamiento del espacio comprendido entre ellos.

Radicales libres: Grupos neutros con un electrón en exceso. Los radicales libres alifáticos son extraordinariamente inestables.

Radioactividad: Desintegración espontánea de ciertos elementos pesados (radio, uranio, torio, etc.), acompañada de emisión de rayos alfa (núcleos de helio positivamente cargados), rayos beta (electrones rápidos) y rayos gamma (radiaciones). El producto final de la desintegración de una familia radioactiva es uno de los isótopos de plomo. La Resolución Comunitaria del Consejo de 22 de julio de 1975 sobre problemas tecnológicos de la seguridad nuclear plantea una armonización progresiva de los criterios de seguridad y estandarización de equipos. Directiva comunitaria 80/836 E sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes, modificada por Directivas 84/467 E, 90/641 E, 84/466 E y recomendación 90/143 E.

Radioactividad artificial: Radioactividad inducida en ciertos elementos por el bombardeo de sus núcleos con partículas de gran energía.

Radioelementos: Elementos químicos radiactivos. Son especialmente frecuentes entre los elementos de la tabla periódica con números atómicos elevados, entre 84 y 92. Ejemplos típicos son, entre otros, el radio y el uranio.

Radiofrecuencia: también denominado espectro de radiofrecuencia o RF, se aplica a la porción del espectro electromagnético en el que se pueden generar ondas electromagnéticas aplicando corriente alterna a una antena. Dichas frecuencias cubren las bandas de espectro desde la banda Extra baja frecuencia (Extremely low frequency) hasta Extra alta frecuencia (*Extremely high frequency*), o sea desde 3Hz hasta 300 Hz.

Radioisótopo: Isótopo que se desintegra radioactivamente a causa de su inestabilidad nuclear.

Radiolario: Ver *Kiesselghur*.

Radionuclido: Cualquier núclido (isótopo de un elemento) que sea inestable y sufra desintegración espontánea e incontrolable.

Radioterapia: Tratamiento de células y tejidos tumorales mediante la aplicación de radiaciones ionizantes.

Radón: Elemento radioactivo y el más pesado de los gases nobles. Se forma por la desintegración del radio y se usa en el tratamiento no quirúrgico del cáncer. Existen emanaciones naturales de este gas. Es soluble en diversas grasas.

RAEE: Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos.

Rambla: Curso de agua generalmente intermitente caracterizado por falta de agua en verano y de caudal inferior al de un río. En épocas de lluvias puede provocar grandes avenidas de agua.

Rascadores: Filtros que eliminan el SO_2 de los humos.

Rasching, anillos de: Cilindros huecos que se emplean para el relleno de torres de stipping, en la depuración de gases y líquidos.

Raspones: Residuo procedente del despalillado de la uva, es decir de separar los granos de uva del racimo.

Rastrojo: Residuo de las cañas de la mies, que queda en la tierra después de la siega.

Ratio de dilución: Relación entre el volumen de agua de un río o caudal de agua y el volumen de agua que se incorpora. Afecta a la capacidad de un río para asimilar productos.

Rayo: Descarga eléctrica entre nubes o entre éstas y la superficie de la Tierra, cuya manifestación luminosa es el rayo y la sonora el trueno. La duración es de una diezmilésima a una millonésima de segundo. La intensidad es mayor de 30 kV/m y la diferencia de potencial mayor de 100 millones de voltios.

Rayos cósmicos: Radiación ionizante procedente del sol y del espacio exterior.

Rayos gamma: Radiación electromagnética de muy baja longitud de onda emitida por un núcleo inestable.

Rayos ultravioleta: Radiación electromagnética invisible, fuertemente ionizada y provocadora de fluorescencia. Proviene del sol y puede ser muy útil o muy peligrosa. Los rayos ultravioletas favorecen la vida de las plantas y se utilizan en algunas técnicas médicas y dentales. Los rayos ultravioletas a los que estamos expuestos (por ejemplo, al tomar el sol) pueden producir cáncer de piel y otras enfermedades de los tejidos. La capa de ozono de la estratosfera representa una protección muy importante respecto a estos rayos ya que elimina la cantidad de esta radiación que puede llegar a la Tierra.

Rayos X: Radiación de naturaleza electromagnética que procede de la corteza atómica. Su poder de penetración depende de la energía suministrada a los electrones por el potencial de aceleración.

RBMA: (Residuos de Baja y Media Actividad). Emiten cantidades pequeñas de radiación. Están formados por herramientas, ropas, piezas de repuesto, lodos, etc., de las centrales nucleares y de la Universidad, hospitales, organismos de investigación, industrias, etc.

RDF: *Refuse Derived Fuel* o combustible procedente del rechazo. O sea la parte combustible de los RSU (papel, plástico, etc.)

RDG: Residuos de depuración de gases en general.

Reacción alcalina: Disolución en la que existen iones hidróxilo (OH-) en exceso. Colorean de azul el papel tornasol rojo.

Reacción edáfica: Reacciones de carácter ácido, neutro o básico que se desarrollan en el suelo. El carácter de la reacción edáfica viene determinado por los iones de hidrógeno contenidos en el agua del suelo.

REACH: Corresponde a las siglas en inglés de Registro, Evaluación y Autorización de Sustancias Químicas. Es una propuesta de reglamento europeo diseñada para paliar la falta de conocimiento sobre los efectos que las sustancias químicas tienen sobre la salud humana y el medioambiente y actuar en consecuencia. Uno de los objetivos es desarrollar mecanismos y procedimientos más eficaces, que hagan recaer sobre la industria una mayor responsabilidad en materia de suministro de información sobre los peligros y las medidas de reducción del riesgo de los productos químicos utilizados. Será debatida a finales del 2005 en el Parlamento y en el Consejo Europeo. Dicha propuesta, con sus 137 artículos, 17 anexos y 1.200 páginas, sustituirá a más de 40 Directivas y reglamentos actuales.

Reactividad: Facilidad con que entra en reacción una sustancia frente a los reactivos muy diversos, dependiendo de una estabilidad limitada por su estructura electrónica.

Reactivo: Sustancia que, por su capacidad de provocar determinadas reacciones, se usa en determinaciones analíticas, ensayos y procesos de tratamiento de aguas.

Reaireación: O reoxigenación. Adición de aire suplementaria, en ríos u otros sistemas donde se precise aire, cuando se prevé un déficit.

Rebajado: Fase del proceso en la industria de curtiembre que consiste en una operación mecánica para igualar el espesor de la piel curtida. El exceso de grueso se elimina en forma de virutas.

rebintos. Se emplea como disolvente en la industria de pinturas y barnices.

Rebozo: Relleno entre dos capas. // Acabado de mortero sobre una pared.

Recarga de acuíferos: Aporte de agua a los acuíferos. La recarga natural procede del agua de infiltración o agua superficial de las precipitaciones que se infiltra en el terreno, del agua de ríos y lagos, y en acuíferos litorales, incluso del agua del mar.

Rechazos: Parte impropia, inadecuada y, por tanto, excedente del proceso de reciclado y compostaje.

Reciclado: Conjunto de sistemas que se siguen, por tratamientos diversos, para la recuperación de materiales a partir de residuos y basuras procedentes de diversos orígenes ~~que~~ de otra manera se convertirían indefinidamente en desechos de todas clases ~~y~~ retorno de este material para su reutilización. La política del reciclado se opone, con mejores características ecológicas, a la del mero vertido, que además de significar la pérdida de recursos no renovables, puede representar focos de contaminación muy importantes en el aire, el suelo y el agua.

Reciclado indirecto: Aprovechamiento de los materiales recuperados sometidos a una transformación, permitiendo su utilización en forma distinta a la original.

Reciclaje: Término empleado de manera general para describir el proceso de utilización de partes o elementos de un artículo, tecnología, aparato que todavía pueden ser usados, a pesar de pertenecer a algo que ya llegó al final de su vida útil.

Recogida de lixiviados: Proceso de recogida y transporte de lixiviados que se generan en una instalación de tratamiento de residuos, por medio del bombardeo o por drenaje pasivo por gravedad, hasta un depósito o una balsa de lixiviados.

Recogida selectiva: Método de recogida de basuras en el que se produce una clasificación y selección de materiales en origen.

RECONS, proyecto: Tiene como objetivo principal hacer viable la aplicación de Sistemas de Gestión Medioambiental en las pequeñas y medianas empresas constructoras, mediante la implantación de un sistema cooperativo en las obras de las empresas adheridas al proyecto, que tenga como referente el EMAS.

Recortes: Residuos de madera procedentes de dar formas regulares a los tableros.

Recrecimiento: Operación consistente en incrementar la altura de algún elemento constructivo de una infraestructura con el fin de reducir el impacto visual o acústico. Relativo a presas de residuos.

Rector biológico: Recinto sin techo donde la materia orgánica contenida en las aguas residuales se somete a degradación biológica a través del fango activado y la incorporación artificial de aire u oxígeno.

Recuperación: Extracción de las sustancias o recursos valiosos contenidos en los subproductos. Normalmente se realiza mediante tratamiento previo importante y se utiliza posteriormente con otra finalidad a la original.

Recuperación de suelos contaminados: Conjunto de operaciones correctivas destinadas a evitar los efectos nocivos que ocasiona o puede ocasionar un suelo con-

taminado y a adoptar las medidas imprescindibles para el restablecimiento de la situación física alterada o que tiendan a impedir nuevos riesgos para las personas o daños en los bienes o en el medio.

Recuperación energética: Aprovechamiento de la capacidad calorífica de los subproductos a través de su uso como combustible, en general después de un proceso de tratamiento previo, mezcla y homogeneización.

Recurso natural: Cualquier tipo de materia prima o medios de producción naturales utilizados por el hombre (para la actividad económica) o por animales, plantas y organismos.

Recurso natural no renovable: Recursos naturales que pueden agotarse por completo o hasta un grado que es económicamente inviable de extraer o conseguir más cantidad. Se trata, en general, de minerales y metales de todas clases, cuyas minas o yacimientos teóricamente pueden llegar un día al agotamiento total. En ocasiones cabe considerarlos como renovables en cierto grado, o al menos recuperables, a través de los circuitos del reciclado, que hacen posible volver a utilizar materias primas como papel, vidrio, metales, etc.

Recursos biológicos: Se entienden recursos genéticos, los organismos o parte de ellos, las poblaciones, o cualquier otro tipo del componente biótico de los ecosistemas de valor o utilidad real o potencial para la humanidad.

Red de evacuación: Conjunto de todas las instalaciones destinadas a la recogida, evacuación y tratamiento de aguas residuales y de lluvia.

Redes arteriales: En urbanismo, el conjunto de autopsias, autovías y otras carreteras de acceso a los núcleos de población y las vías de enlace entre las mismas, que discurran total o parcialmente por zonas urbanas.

Redes tróficas: En un ecosistema, circuitos de interrelación entre las especies por las que circulan la materia y la energía, con una organización mucho más compleja que la representada por la pirámide trófica que es una síntesis de los niveles tróficos, más global y esquemática.

Reducción en origen: Disminución del volumen o la peligrosidad de los subproductos generados mediante la puesta en marcha de prácticas adecuadas o la modificación de procesos que impliquen el cambio a tecnologías más limpias, equipos más eficientes, sustitución de materias primas o modificación de la composición de los productos. Véase *Minimización*.

Redworm: Variedad de gusano que se utiliza para el proceso de vermicompostaje.

Refinerías de petróleo: La Directiva 84/360 relativa a la lucha contra la contaminación atmosférica procedente de las instalaciones industriales, requiere a los Estados miembros para que exijan una autorización previa a la explotación de la instalación industrial de refinería de petróleo.

Refino: Proceso de transformación del petróleo crudo en una serie de hidrocarburos utilizables como energía final.

Reflectora, superficie: Superficie concentradora basada en la reflexión de la radiación.

Reforestar: Repoblar un terreno con plantas forestales. Se utiliza comúnmente en el sentido de plantar por segunda vez un terreno cuyo suelo arbóreo ha desaparecido por incendios o tala.

Reforma agraria: Conjunto de medidas para alterar la fuerte concentración en la distribución de la propiedad de la tierra y crear las condiciones de una explotación más social en el sector rural. Normalmente supone el paso de la situación de tenencia de grandes propiedades ~~lati~~fundios ~~en~~ pocas manos, a la del reparto de la tierra entre los jornaleros para su explotación individual, cooperativa o en granjas estatales.

Reforzante: Sustancia utilizada para estabilizar la composición y estructura física de un material determinado.

Refracción: Cambio de dirección que experimenta la luz al pasar de un medio a otro. Desviación que sufre un rayo de luz cuando atraviesa un cuerpo de densidad diferente al medio del que procedía.

Refractariedad: Propiedad que hace referencia a la resistencia de los materiales a las altas temperaturas sin sufrir variaciones. Los materiales a base de arcilla, cerámicos, de baja conductividad térmica, poseen esta propiedad y son capaces de soportar temperaturas extremadamente elevadas sin sufrir cambios estructurales.

Refractarios: Materiales para el revestimiento interior de la cámara de combustión de los hornos. Su función es resistir las solicitaciones mecánicas a alta temperatura. Inmediatamente después se sitúa el aislante térmico. La gran inercia térmica de la masa de refractario contribuye a minimizar las variaciones de temperatura en el interior del horno.

Refrigerantes: Líquido empleado para disipar calor en los motores de combustión, por ejemplo, agua, etileno o glicol. // Sustancia apta para ser usada como agente activo en las máquinas frigoríficas, por ejemplo, el amoníaco, dióxido de carbono, dióxido de azufre, cloruro de metilo, etc. Recomendación 90/438, sobre la reducción de los CFCs utilizados por la industria de la refrigeración en la Comunidad.

Regadío: Tierras de cultivo que reciben más agua que la de la lluvia, mediante un procedimiento artificial, cualquiera que sea la duración o cantidad de los riegos.

Regeneración: Tratamiento que se efectúa a algunos subproductos para facilitar su reciclaje. Permite que un subproducto recupere sus prestaciones originales.

Regeneración de aguas residuales: Proceso que engloba el tratamiento de aguas residuales con el objeto de hacerlas idóneas para un uso beneficioso, su conducción hasta el lugar de uso y su aplicación práctica.

Regenerar: Realizar una regeneración.

Regla de Corte: Concepto utilizado en el Ecobalance y corresponde a la elección de determinados conceptos o partes de un total que uno deja al margen por diversos motivos.

Regs: Desiertos de grava. En términos generales la palabra regs designa la clase de «pavimento» del desierto.

Regulador del crecimiento: Sustancias químicas, naturales o sintéticas, que controlan el crecimiento de plantas, activándolo como las fitohormonas (auxina, giberelina) o inhibiéndolo (inhibinas).

Rehabilitación: Retorno de un ecosistema o población degradados a una condición de no degradación, que puede ser distinta de su condición original.

Relación carbono-nitrógeno: Se obtiene realizando el cociente entre el % de carbono y el % de nitrógeno presente en los residuos orgánicos. Esta relación es importante para el posterior tratamiento biológico de los residuos y otros materiales que contengan materia orgánica de aplicación como es el abono orgánico.

Relación de sustancias o materias peligrosas: La Ley 20/1986, de 14 de mayo, Básica de residuos tóxicos y peligrosos relaciona las siguientes en su anexo 1. 1. El arsénico y sus compuestos de arsénico. 2. El mercurio y sus compuestos de mercurio. 3. El cadmio y sus compuestos de cadmio. 4. El talio y sus compuestos de talio. 5. El berilio y sus compuestos de berilio. 6. Compuestos de cromo hexavalente. 7. El plomo y sus compuestos de plomo. 8. El antimonio y sus compuestos de antimonio. 9. Los fenoles y los compuestos fenólicos. 10. Los cianuros orgánicos e inorgánicos. 11. Los isocianatos. 12. Los compuestos órgano-halogenados. 13. Los disolventes clorados. 14. Los disolventes orgánicos. 15. Los biocidas y las sustancias fitosanitarias. 16. Los productos a base de alquitrán procedentes de operaciones de refino y los residuos alquitranados procedentes de operaciones de destilación. 17. Los compuestos farmacéuticos. 18. Los peróxidos, cloratos, percloratos y nitruros. 19. Los éteres. 20. Las sustancias químicas de laboratorio no identificables y o nuevas cuyos efectos sobre el medio ambiente no sean conocidos. 21. El amianto (polvos y fibras). 22. El selenio y sus compuestos de selenio. 23. El teluro y sus compuestos de teluro. 24. Residuos procedentes de la industria del dióxido de titanio. 25. Los compuestos aromáticos policíclicos (con efectos cancerígenos). 26. Los carbonilos metálicos. 27. Los compuestos solubles de cobre. 28. La sustancias ácidas y o básicas utilizadas en los tratamientos de superficie de los metales. 29. Los aceites usados minerales o sintéticos, incluyendo las mezclas agua-aceite y las emulsiones.

Relave: (tail) corresponde al residuo, mezcla de mineral molido con agua y otros compuestos, que queda como resultado de haber extraído los minerales sulfurados en el proceso de flotación. Este residuo, también conocido como cola, es transportado mediante canaletas o cañerías hasta lugares especialmente habilitados o tanques, donde el agua es recuperada o evaporada para quedar dispuesto finalmente como un depósito estratificado de materiales finos (arenas y limos).

Relleno (también rellenado): Técnica consistente en depositar barro, arena y otro material dentro de un medio acuático para crear más zona terrestre. Normalmente se utiliza con propósitos agrícolas o comerciales. Estas prácticas dañan gravemente la ecología de un área.

Relleno sanitario: Según la *American Society of Civil Engineers* (ASCE) es la técnica para la disposición de la basura en el suelo sin causar perjuicio al medio ambiente y sin causar molestias o peligro para la salud y seguridad pública. Utiliza principios de ingeniería para confinar basura en la menor área posible, reduciendo su volumen al mínimo practicable y para cubrir la basura así depositada con una capa de tierra con la frecuencia necesaria. Término equivalente a depósito o vertedero controlado.

Rem: Unidad de medida de dosis equivalente, equivalente a la centésima parte de un sievert.

Remediación: Remoción de contaminación o contaminantes del medio ambiente ~~sue~~lo, aguas subterráneas, sedimento o aguas de la superficie ~~pa~~ra la protección general de la salud humana y del ambiente, o de tierras provistas para el redesarrollo.

Remineralización: Adición de bicarbonato cálcico a un agua demasiado dulce. También se realiza a un agua después de su osmotización.

Rendering: La palabra renderización es una adaptación al castellano del vocablo inglés rendering y que define un proceso de cálculo complejo desarrollado por un ordenador destinado a generar una imagen 3D o secuencia de imágenes 3D. La traducción más fidedigna es «interpretación», aunque se suele usar el término inglés. También se emplean coloquialmente los términos «renderizar» y «renderizado». Se aplica a los gráficos por ordenador, más comúnmente a la infografía.

Rendido: Etapa de curtición donde la piel se somete el material a un baño con enzimas, ácidos orgánicos y detergentes para eliminar los restos orgánicos que puedan quedar después de los procesos anteriores.

Rendimiento, eficiencia energética: Es la relación existente entre la energía que requiere un determinado equipo para su funcionamiento y el servicio que proporciona (luz, frío, calor, etc.)

Renta de la Tierra: Aportación teórica de David Ricardo, que valora el hecho diferencial de dos productores agrícolas, el uno en tierras marginales y el otro en tierras de mejor calidad, pudiendo este último vender al precio del primero con un mayor margen de ganancia. Las rentas «ricardianas» pueden obtenerse también por intensidad más elevada de los cultivos, y por mayor proximidad al mercado. Se trata, en realidad, de rentas

de monopolio, de ingresos adicionales por encima de los que podrían obtenerse en condiciones competitivas.

Reómetro: Instrumento que mide la viscosidad de un fluido.

Reostato: Dispositivo que se utiliza para graduar la intensidad de la luminosidad de una fuente de luz.

REPACAR: (Asociación Española de Recuperadores de Papel y Cartón), nace en 1968 con el fin de agrupar a las empresas recuperadoras de papel y cartón, e intentar solventar a nivel colectivo los problemas empresariales, contribuir a mejorar el medio ambiente, así como a potenciar la recuperación de papel y cartón en España. En la actualidad aglutina al 90% de las compañías del sector, que procesan el 95% del total de la producción nacional.

Repoblación: Volver a poblar. // Conjunto de árboles o especies vegetales en terrenos repoblados.

Repoblación forestal: Introducción de arbolado en un área mediante plantación o siembra. La actividad reforestadora puede estar dirigida a fines económicos (producción maderera), restauración del paisaje o protección del suelo. Las especies utilizadas pueden ser alóctonas (frecuentemente exóticas, como los eucaliptos) o autóctonas.

Repositorio: Instalación diseñada para disponer en forma adecuada los residuos nucleares, ubicado en un sitio geológicamente estable y provisto de barreras naturales y artificiales para contener en forma segura dichos residuos.

Reserva de biosfera: Zonas definidas internacionalmente y gestionadas para la investigación, educación y capacitación. Conservar para el uso presente y futuro la diversidad e integridad de comunidades bióticas de plantas y animales dentro de sus ecosistemas naturales y salvaguardar la diversidad genética de especies de que depende su evolución continuada.

Residuo: Cualquier sustancia u objeto del cual su poseedor se desprenda o del que tenga la intención o la obligación de desprenderse. Competencia de las autoridades municipales, Directivas 75/442, relativa a los residuos, modificada por la Directiva 91. Ley 42/75 sobre desechos y RSU modificada por Real Decreto legislativo 1163/86 y la Ley 10/98 Española de residuos..

Residuos agrícolas: Los generados por la actividad agrícola. Se agrupan en dos grandes categorías: residuos de cultivos leñosos (generados por podas de olivos, viñas, frutales, etc.) y los residuos de cultivos herbáceos (de cultivo de trigo, cebada, maíz, centeno, etc.). Estos subproductos se utilizan normalmente como materia prima en otras industrias.

Residuos asimilables a urbanos: Residuos procedentes del comercio, las oficinas y servicios. Aquí se incluyen los generados por mercados municipales, comedores públicos, hospitales (no los residuos sanitarios), etc., que debido a su problemática específica ya contaban con recogida especial.

Residuos combustibles, de los RSU: Papel, cartón, plásticos, madera, gomas, cueros y textiles.

Residuos comerciales: Residuos generados por la actividad de los diferentes circuitos de distribución de bienes de consumo.

Residuos de construcciones y demolición: Materiales de desecho procedentes de obras y reparaciones como escombros, ladrillos, etc. También residuos de deconstrucción.

Residuos domiciliarios: Residuos procedentes de las actividades de la vida en comunidad. Son los materiales de desecho de las viviendas, de la limpieza viaria y residuos comerciales e industriales asimilables a residuos domiciliarios.

Residuos especiales: Su carácter de especiales puede provenir por su tamaño (al no poder ser introducidos en contenedores ordinarios), por su composición, olor o estado en que se encuentran. Los productos de goma, detergentes y otros productos químicos, desperdicios de matadero y productos tóxicos son especiales.

Residuos fermentables: Restos orgánicos fermentables. Básicamente, restos de alimentos.

Residuos industriales: Subproductos generados en procesos industriales que no se reciclan y que no pueden recuperarse componentes ni energía por ser imposible, por no existir la tecnología necesaria, por no existir mercado, por su coste o por no conocerse sus posibilidades.

Residuos inertes: Metales, vidrios, restos de reparaciones domiciliarias, escorias y ciertas cenizas.

Residuos líquidos: Residuos en forma líquida. Son aquellos que presentando un aspecto cristalino, contienen un catión o compuesto orgánico que hace que no puedan catalogarse de aguas residuales y deben ser tratadoscomo residuos sólidos. (Un ejemplo representativo son las aguas de escurrido en la industria galvanoplástica).

Residuos municipales: Los residuos domésticos y también los residuos de comercios y de oficinas y servicios así como otros residuos que, por su naturaleza o composición, pueden asimilarse a los residuos domésticos.

Residuos radioactivos de alto nivel: Residuo generado por el combustible de un reactor nuclear, que se encuentra en el reactor o en la planta de procesamiento del combustible nuclear. // La actividad de ENRESA (Empresa Nacional de Residuos Radioactivos) está regulada por R.D. 1522/84 de 14 de julio, con la O. de 30-12-88.

Residuos radioactivos de bajo nivel: Residuos radioactivos de menor actividad y, por tanto, menos peligrosos que los generados por un reactor nuclear. Normalmente se producen en hospitales, laboratorios de investigación y ciertas industrias.

Residuos sanitarios: Desechos de la actividad hospitalaria. Debe tenerse en cuenta la más que probable presencia de gérmenes patógenos y restos de medicamentos diversos. Suelen estar sometidos a reglamentación especial.

Residuos sólidos: Según definición de la USEPA, es todo tipo de materiales, productos de desecho o todo lo que provenga de una planta de tratamiento de basuras, de una depuradora o de una instalación de control atmosférico, o cualquier otro material desechado incluidos sólidos, líquidos, semisólidos o materiales con contenido gaseoso resultantes de una actividad industrial, comercial, minera o agrícola. Pueden clasificarse según la naturaleza de su origen (agrícolas, forestales, mineros, industriales, etc.), por el lugar de producción (urbanos, hospitalarios, etc.) y por el tipo de materiales (plásticos, envases, embalajes de cartón, neumáticos, etc.).

Residuos sólidos urbanos (RSU): Residuos que se generan el espacios urbanizados como consecuencia de las actividades de consumo y gestión de actividades domésticas (viviendas) servicios (hostelería, hospitales, oficinas, mercados, etc.) y tráfico viario (papeleras y residuos varios de pequeño y gran tamaño).

Residuos tóxicos y peligrosos (RTyP): Residuos sólidos, líquidos (más o menos espesos) y gases que contengan alguna sustancia que por su composición, presentación o posible mezcla o combinación puedan significar un peligro presente o futuro, directo o indirecto, para la salud humana y el entorno. Estos residuos poseen como mínimo una de estas cuatro características: corrosividad, reactividad, toxicidad, inflamable o está presente en alguna de las listas especiales de la USEPA. Requieren tratamiento y gestión específicos para evitar sus efectos potenciales nocivos. Directiva marco 75/442 y directiva 78/319. En España la Ley 20/1986 de 14 de Mayo, Básica de Residuos Tóxicos y Peligrosos; aprueba su reglamento de ejecución el R.D. 833/88 de 20 de julio. Directiva 84/631 relativa al tránsito transfronterizo, modificada por la Directiva 87/112, por la resolución 89/9 y la Decisión 90/170. En España la O. 12/3/90 ha adaptado la Directiva.

Residuos voluminosos: Materiales de desecho de origen doméstico que por su forma, tamaño, volumen o peso son difíciles o imposibles de recoger y transportar por los servicios de recogida convencionales como por ejemplo muebles, electrodomésticos, etc.

Resina de intercambio iónico: Polímero orgánico que tiene la propiedad de intercambiar cationes y/o aniones.

Resinas: Recurso forestal. Sustancia sólida o de consistencia pastosa, insoluble en el agua, soluble en alcohol y en aceites esenciales y capaz de arder en contacto con el aire. Se obtiene naturalmente como producto que fluye de varias plantas y artificialmente por destilación de las trementinas. // Resinas termoplásticas o plásticos. Moléculas rígidas de estructura tridimensional como las resinas de fenolformaldehído.

Resistencia: Capacidad de un organismo para hacer frente a influencias adversas del ambiente, como por ejemplo, a los parásitos, infecciones, etc. Está condicionada por la herencia y las relaciones ambientales. // En medicina, es la capacidad heredada de hacer frente a las infecciones o sustancias tóxicas.

Resistividad: Inverso de la conductividad.

Resonancia: o Mesomería. Distribución electrónica de una molécula que no puede representarse por una estructura sencilla determinada sino por una combinación híbrida.

Respirómetro: Aparato diseñado para estudiar la actividad respiratoria de los fangos activados.

Responsabilidad compartida: Principio de participación de todos los agentes económicos incluidos los poderes públicos, empresas públicas y privadas y público en general. // Combinación de agentes e instrumentos en las esferas adecuadas sin cuestionar la división de competencias entre la Comunidad, los estados y las administraciones regionales y locales.

Restablecimiento: Retorno de un ecosistema o población degradados a su condición original.

Restauración paisajística: Conjunto de operaciones que tienen por finalidad que la percepción visual de un espacio sea similar o evolutivamente concordante a la que componía antes de ser alterado por la actividad humana, especialmente por una obra pública o una actividad extractiva.

Restitución: Punto donde el agua se devuelve al río siguiendo su curso normal.

Retardante de llama: En términos químicos, son un grupo de diversas sustancias con un único elemento común: reducen la inflamabilidad de los materiales. Los retardantes de llama están agrupados de acuerdo a elementos químicos que les dotan de efectividad. Bromo, cloro, fósforo, aluminio, magnesio y nitrógenos son los elementos más importantes:

Retención: Cantidad de precipitación sobre un área que no escapa en forma de corrientes superficiales.

Reutilización: Ver *Reutilizar.*

Reutilizar-reusar: Proceso de minimización de generación de residuos consistente en recuperar productos utilizados que de otra manera se convertirían en productos de desecho.

Revegetación: Conjunto de operaciones de siembra e implantación de árboles y arbustos, y si es necesario, de mantenimiento que tienen por objeto el fomento de una nueva cubierta vegetal en una superficie deforestada.

Revolución verde: Expresión que desde la década de 1960 se emplea para hacer referencia a las posibilidades de conseguir aumentos espectaculares en la producción

agraria en los países del Tercer Mundo, a base de emplear semillas de alta calidad, fertilizantes y sistemas de regadío adecuados; todo ello con el resultado de altos rendimientos. El padre de la Revolución Verde, Borlaug, recibió el premio Nobel de la Paz por sus trabajos, que llevó a cabo inicialmente en México; para después extenderlos a la India y más tarde a África.

Reward, proyecto: Tiene como objetivo potenciar el mercado de la reutilización del árido procedente de residuos y demolición a partir de diferentes ensayos que validen sus propiedades y de la elaboración de documentos normativos que regulen su uso. Este proyecto fue concedido por la Unión Europea al Centre Scientifique et Technique de la Construction en Bégica (CSTC) y al Centre Experimental de Recherches et D'Etudes du Batiment et des Travaux en Francia (CEBTP) y en el que el ITeC español colabora activamente.

Reynolds, número de: Número adimensional que indica si el régimen de un flujo es laminar o turbulento.

Riesgo de radiación: Peligro para la salud procedente de la exposición a una radiación ionizada, ya diluida a una radiación externa o a radiaciones de materiales radioactivos dentro del cuerpo.

Riesgo, análisis de: Proceso de evaluación de las alternativas posibles a una situación de riesgo y la elección de la más adecuada. Requiere consideraciones legales, económicas y sociales.

Rift: Fisura de origen volcánico que contribuye a la deriva de los continentes.

RINR: Reglamento de Instalaciones Nucleares y Radioactivas donde se establecen las normas básicas relativas a la protección sanitaria de los trabajadores y de la población contra los riesgos que resultan de las radiaciones ionizantes.

Ripios: Residuos sólidos generados en el proceso de lixiviación del mineral oxidado y sulfuros secundarios.

Rizodegradación: Consiste en la transformación de contaminantes orgánicos a través de la actividad microbiana, favorecida por la presencia de los exudados de las raíces, entre los que se hallan: azúcares, aminoácidos, ácidos orgánicos, ácidos grasos, esteroles, factores de crecimiento, nucleótidos, flavononas y enzimas. Estos exudados pueden contribuir incluso a incrementar la población microbiana.

Rizofiltracion: Consiste en la adsorción, precipitación sobre las raíces, o absorción en el interior de las raíces de los contaminantes presentes en la solución del suelo, a través de procesos bióticos o abióticos. Los exudados de las raíces pueden provocar, en ocasiones, la precipitación de algunos metales.

Rizosfera: Parte del suelo inmediata a las raíces donde tiene lugar una interacción dinámica con los microorganismos. Las características químicas y biológicas de la rizosfera se manifiestan en una porción de apenas 1 mm de espesor a partir de las raíces. Es una zona donde se dan toda una serie de reacciones físicas y químicas que afectan a la estructura del suelo y a los organismos que viven en él, proporcionándole unas propiedades diferentes.

RME (rapeseed oil methyl ester): Éter metílico de aceite de colza.

Roca industrial: Roca extraída para su transformación o manipulación industrial.

Roca volcánica: Roca eruptiva que suele presentar textura porfílica con los fenocristales rodeados por una pasta de grano muy fino, generalmente microscópico. A menudo, se caracterizan por la presencia de vidrio (materia amorfa) debido a que su enfriamiento es muy rápido. Son frecuentes las texturas fluidales y las burbujas producidas por el escape de gas.

Rocío, punto de: Temperatura de condensación de un vapor.

Rodenticidas: Pesticidas especialmente concebidos para la eliminación de roedores. Están elaborados entre otras sustancias, con sales de talio.

Rodete: Elemento mecánico móvil de una turbina que transmite un movimiento de rotación al eje como consecuencia de la acción del agua o vapor de agua. // Rotor o miembro giratorio de la turbina hidráulica.

RoHS: La directiva 2002/95/CE de Restricción de ciertas Sustancias Peligrosas en aparatos eléctricos y electrónicos, (RoHS del inglés «Restriction of the use of certain Hazardous Substances»), fue adoptada en febrero de 2003 por la Unión Europea. La directiva RoHS entró en vigor el 1 de julio de 2006, pero no es una ley, es simplemente una directiva. Esta directiva restringe el uso de seis compuestos peligrosos en la fabricación de varios tipos de equipos eléctricos y electrónicos. Está muy relacionada con la directiva de Residuos de Equipos Eléctricos y Electrónicos (WEEE por sus siglas en inglés).

«Roll of», transporte de carga: Vehículos tipo trailer para poder efectuar el intercambio de contenedores de capacidad de hasta 30 m3. Este sistema es apto para la recolección de altos volúmenes de residuos sólidos difíciles de compactar.

RPU: (Residuo Peligroso Urbano). Suelen tener un tamaño pequeño y contaminar el resto de residuos urbanos no peligrosos. Estos pueden ser pilas, aceites vegetales, medicamentos, cosméticos, aceites minerales, entre otros.

RSU: Véase *Residuos sólidos urbanos*.

Ruido ambiental: Conjunto de ruidos, más o menos regulares, característicos de un ambiente determinado.

Rupícola: Especie que vive sobre un sustrato rocoso.

Rutilo: Óxido de titanio que cristaliza en el sistema tetragonal. El mineral suele contener hierro, que puede llegar al 10%. Se halla en los granitos y en numerosos minerales. Muy empleado para fabricar pinturas y como fuente de titanio.

Sabana: Bioma que consiste en herbazales con árboles o grupos de árboles esparcidos que se dan en Africa, Sudamérica y Australia. Las escasas especies vegetales deben ser resistentes a la sequía y al fuego y hay muchas especies de mamíferos herbívoros.

Sacarificación: Proceso de transformación de polisacáridos (almidón, celulosa, etc.) en azúcares simples fermentables.

Sacarina: Edulcorante artificial.

Sales solubles: Materia mineral disuelta en el agua. // También se utiliza como uno de los parámetros para la determinación de la carga contaminante de las aguas residuales. // Ver *eflorescencia*.

Salfuman: Disolución de HCl en agua. La concentración varía entre el 15 y el 25%. El HCl es un gas y, comercialmente se vende como gas en botellas a presión disolución saturada al 35% (aproximadamente) salfuman y aguafuerte con concentraciones del 15 y el 25% (a veces un poco más).

Salinas: Zonas donde se obtiene sal por evaporación del agua que se hace circular por una serie de canales hasta unos depósitos de poco fondo o cristalizadores donde la sal precipita. La obtención de la sal puede hacerse a partir del agua de mar (salinas marítimas) o de aguas continentales ricas en sales procedentes de yacimientos de evaporitas (salinas interiores, frecuentes en cuencas endorréicas).

Salinidad: Grado de sal en el agua.

Salinización: Efecto de la agricultura en regadío sobre los suelos, provocado por cultivos de invernadero que aumenta la concentración de sales.

Salitre: Nitrato potásico (NO_3K) se produce en el suelo donde se descomponen materias vegetales y animales.

Salmonella: Género de bacterias *Gram* negativas capaces de producir infecciones intestinales (salmonelosis). Son eliminadas en las heces fecales, por lo que pueden aparecer en aguas residuales. Las personas portadoras pueden fácilmente contaminar alimentos, lo que puede originar infecciones alimentarias.

Salmonelosis: Ver *salmonella*.

Salmuera: Solución acuosa muy concentrada en sales, utilizada generalmente para conservar y dar gusto a ciertos alimentos (pescados, aceitunas,...). También resultante de procesos industriales.

Salmueroductos: Tuberías para transportar la salmuera resultante del proceso de desalinización.

Salubridad: Conjunto de condiciones idóneas para el mantenimiento de un medio saludable y ausente de agentes contaminantes.

Saneamiento: Acción de recoger, evacuar o depurar, con o sin tratamiento previo, y siguiendo las normas vigentes, el agua de lluvia, las aguas residuales o los residuos sólidos.

Saponificación: Reacción que tiene lugar entre un éster o ácido graso y una base, produciendo una sal**:** jabón.

Saprolita: Roca descompuesta e impregnada de materia orgánica. Roca de arcilla, frágil y terrosa y generalmente de colores oscuros.

Saran: Plástico. Fibra sintética basada en el cloruro de vinilideno y en el cloruro de vinilo.

Saturnismo: Intoxicación crónica por exposición al plomo, sus sales y compuestos. Esta enfermedad es llamada de esta forma debido a que las sales de plomo se les llamaba antiguamente «sales de Saturno». La vía de entrada al organismo es fundamentalmente respiratoria, aunque puede penetrar por vía oral y algunos pocos compuestos por la piel. En la mujer embarazada puede pasar al feto a través de la placenta, que se ven afectados en su crecimiento y desarrollo, aún con cantidades mínimas de inhalación o ingesta.

SBS: Véase *Síndrome del edificio enfermo*.

Scavengers: Resinas aniónicas de alta porosidad.

Scrubber: Instalación para lavar y tratar la contaminación de aire que utiliza un spray de agua o un reactivo o un proceso para atrapar los contaminantes de las emisiones.

Secador: Equipos en el tratamiento de fangos, utilizados cuando se quiere conseguir un grado de sequedad mayor que el que aporta la centrifugación o la filtración. El secado por calentamiento se efectúa normalmente cuando los fangos se destinan a vertedero, para lo que es necesario bajar su humedad hasta el 10%. Hay diversos tipos de secadores para este fin.

Secano: Tierras cultivadas que no reciben más agua que la de la lluvia.

«Secar»: Tipo de cemento refractario compuesto casi exclusivamente por Al_2O_3 (70%) y CaO.

Secuestro: Confinamiento del CO_2 atmosférico procedente de la combustión de combustibles fósiles en fosas subterráneas o bien la formación de carbonatos.

Sedimentación: Depósito de material en lugares de la superficie terrestre y del fondo de masas de agua (mares, océanos, lagos, pantanos, etc.) distintos al lugar de origen. Por extensión, se denomina así al proceso de dejar depositar los sólidos del agua residual por efecto de la gravedad durante su tratamiento. Este proceso forma parte de la potabilización del agua.

Sedimento: Tierra, arena y minerales arrastrados del suelo al agua, normalmente después de una precipitación lluviosa. Se apilan en pantanos, ríos y puertos destruyendo áreas de anidación de peces y animales marinos y formando una capa que impide que la luz solar llegue a las plantas acuáticas.

Seísmo: Movimiento brusco de la corteza terrestre. Los seísmos, sismos o terremotos se producen por liberación de energía, idealmente en un punto, situado a cierta profundidad, llamado foco o hipocentro. Esta energía se transmite por el interior de la Tierra de forma ondulatoria (ondas P o primaria y ondas S o secundarias). La interacción de estas ondas con la super-

ficie terrestre produce las ondas L o superficiales, causantes de los daños sísmicos. El registro gráfico de los terremotos se realiza mediante aparatos llamados sismógrafos. La magnitud de los terremotos se mide en la escala de Richter. Su intensidad se mide de acuerdo con la escala MSK y se representa en mapas de superficie mediante líneas de igual intensidad sísmica o isosistas. Los terremotos se deben a varias causas, pero las principales son las tectónicas que son aquellos en que la liberación de energía se produce como consecuencia del desplazamiento de bloques sobre un plano de falla.

Sellado: Acción de limitar la entrada de agua, nutrientes u oxígeno al sistema de vertido, con lo que se dificulta, e incluso paralizan, los procesos naturales que tiene lugar en el suelo.

Sello: Taponamiento o contención de una corriente o masa sólida a base de un material impermeable.

Semicoque: Combustible. Coalita. Nombre comercial de un combustible producido por carbonización de la hulla a temperatura aproximada de 600 ℃. Se usa para fines domésticos y su potencia calorífica por kilogramo de peso oscila alrededor de 7.200 kilocalorías.

Sentina: Bodega de un barco. Son típicos los residuos de sentina formados por una mezcla de hidrocarburos y agua.

Separación con membrana, procesos de: Métodos de tratamiento de los metales contenidos en los efluentes industriales que consiste en hacer pasar el agua a través de una membrana porosa permeoselectiva en cuya superficie se acumula el material metálico concentrado. La membrana suele ser de acetato de celulosa, poliamida o polisulfona.

Separador magnético: Dispositivo que por medio de un electroimán sirve para efectuar la separación de aquellas partículas magnéticas que se encuentran en una mezcla de residuos o desechos.

Separador neumático: Dispositivo en el que corrientes verticales, horizontales o ciclónicas clasifican partículas finamente divididas en fracciones de igual capacidad de sedimentación o materiales relativamente gruesos se separan por gravedad de los polvos más finos que son arrastrados al exterior.

Separador por tamaños Goetz: Instrumento para clasificar por tamaños las partículas en suspensión en el aire, formado por un rotor de gran velocidad con canal helocoidal a lo largo del cual circulan las partículas en flujo de láminas y se depositan por centrifugación sobre un envolvente desmontable que rodea el rotor.

Sericita: es la denominación para las variedades de placas finas o microcristalinas de la mica moscovita con un tamaño de grano <2 mm.

Serpentinas: Constituyen un grupo de minerales que se caracterizan por no presentarse en forma de cristales, excepto en el caso de pseudomorfismo. Son productos de alteración de ciertos silicatos magnésicos, especialmente olivino, piroxenos y anfíboles.

Serrajes: Es el residuo sólido más fácilmente valorizable, ya que se pueden obtener gelatinas de alto valor añadido. También pueden se puede secar en moldes con diferentes formas para producir objetos masticables para perros, se pueden obtener colas y fibras para embutidos.

SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry): Sociedad internacional sin fines de lucros que tiene como misión el de apoyar el desarrollo de principios y prácticas para protección, mejoramiento y gestión de la calidad y ecosistema integral del medio ambiente sostenible.

Seveso: Ver *TCDD*.

SFHc: Sulfato ferrosos heptahidratado comercial.

Sievert: Unidad de medida de la dosis radioactiva equivalente, igual a 1 joule por kilogramo.

SIG: Sistema integrado de gestión de Envases y Embalajes.

Sigfito Agroenvases SL: Sociedad sin ánimo de lucro cuyo objeto social es organizar un sistema de recogida periódica de residuos de envases fitosanitarios para darles un destino final adecuado, en cumplimiento de la normativa general y específica de envases y residuos. Este sistema permite el cumplimiento de las obligaciones en materia de residuos de envases fitosanitarios a los distintos colectivos: envasadores, distribuidores, agricultores, etc. Este modelo responde a dos principios: quien contamina, paga, y el principio de responsabilidad compartida, comprometiendo en la gestión responsable a todos los agentes intervinientes en la producción de los residuos de envases.

SIGRE: Sistema de Gestión de Residuos de Envases del Sector Farmacéutico. Es el sistema de recogida selectiva de medicamentos y envases de medicamentos, que ha puesto en marcha la industria farmacéutica española, con la colaboración de las farmacias y de la distribución, para facilitar que los ciudadanos puedan desprenderse de los envases vacíos o con restos de medicamentos, así como de los medicamentos caducados que tienen en sus hogares.

Sílex: Variedad del cuarzo.

Sílica fume: También denominada microsílice. Son partículas ultrafinas que constituyen un subproducto de la industria del ferrosilicio. Se presentan bajo la forma de microesferas de sílice amorfa, con 90% a 96% de SiO_2, con diámetro promedio del orden de 0,1 micrones y densidad de 2,0 g/cm^3. Su acción en el concreto se debe a su alta actividad puzolánica y a la finura de sus partículas, que incrementa la compacidad de las pastas de cemento hidratadas. Es una adición necesaria en concretos de resistencia superior a los 600 kg/cm^2 llamados de alta resistencia.

Silicato cálcico: Silicato hidratado o anhídro, con proporciones variables de CaO y SiO_2. También denomi-

nado silicato de calcio. Es un polvo suelto, entre blanco y blancuzco, que sigue quedando suelto después de absorber cantidades relativamente grandes de agua u otros líquidos

Silicatos aluminosos: Familia de minerales cuya estructura principal está integrada por SiO_2 y Al_2O_2. Por lo general también contienen óxidos alcalinos y alcalinotérrea y agua de constitución. Habitualmente son razonablemente refractarios.

Sílice: Muy abundante en la naturaleza en forma de cuarzo. Es la base de los silicatos. Fórmula SiO_2.

Sílice activada: Solución de ácido polisilícico $(H_2SiO_3)_4$. se usa en la producción de agua potable.

Silicícola: Plantas o formaciones vegetales que viven en terrenos silícicos, los cuales son frecuentes sobre sustratos graníticos o metamórficos, de amplia representación en la mitad occidental de la Península Ibérica.

Silicio: Metaloide que ocupa el numero 14 de la tabla periódica de los elementos. Muy usado, ya sea en forma amorfa o cristalina para la construcción de soportes para aplicaciones fotovoltaicas.

Silicofluoruro de sodio: Compuesto usado para fluorar las aguas potables.

Silicona: Polímero inodoro e incoloro constituido principalmente de silicio. Es inerte y estable a altas temperaturas, lo que la hace útil en gran variedad de aplicaciones industriales.

Silicosis: Enfermedad profesional, muy frecuente en la minería, que se desencadena por la inhalación de polvo (generalmente minerales compuestos de sílice).

Silo: Depósito vertical cilíndrico o prismático con una trampilla destinada al almacenamiento de diferentes productos.

Siloxano: Compuesto químico que se forma en los vertederos a partir de las siliconas vertidas y de productos cálcicos. Son volátiles y se mezclan con el biogás generando graves problemas al cristalizarse en las camisas de los motores de cogeneración.

Silvicultura: Gestión y explotación del suelo forestal. La Agenda 21 propone la creación de programas nacionales de acción en silvicultura para promover el desarrollo sostenible de los bosques y apoyar la aplicación de las declaraciones de principios sobre los bosques.

Simazine: Herbicida orgánico que actúa sobre el suelo, utilizado para controlar la germinación de muchas cosechas y para la limpieza de tierras baldías, caminos, etc. Su larga duración puede impedir los rebrotes durante un año.

Simbiosis: Asociación de dos organismos (vegetales o animales) que sacan provecho mutuo.

Simbióticos: Organismos que obtienen energía y nutrientes de la planta en la que viven, a la que proporcionan algún beneficio.

Sinapsis: Espacio entre neuronas donde se lleva a cabo el proceso de neurotransmisión que puede verse afectado por la acción de disruptores o contaminantes organofosforados y carbamatos.

Síndrome del edificio enfermo (SEE): Se conoce también como Sick Building Syndrome (SBS). Corresponde a un conjunto de enfermedades originadas o estimuladas por la contaminación del aire en espacios cerrados. Pueden ser originadas por la mala ventilación, la descompensación de temperaturas, las cargas iónicas y electromagnéticas, las partículas en suspensión, los gases y vapores de origen químico y los bioaerosoles, entre otros agentes causales identificados por la OMS. El tipo de malestares pueden ser: jaquecas, náuseas, mareos, resfriados persistentes, irritaciones de las vías respiratorias, piel y ojos, etc. Entre estos melestares las alergias ocupan un papel importante.

Sinergismo: Influencia mutua que se ejercen diferentes sustancias activas produciendo un efecto mayor o nuevo y normalmente no previsible. El fenómeno resultante es mayor que la suma total de sus efectos individuales.

Sinterizar (Sinterización): es el engarce parcial de partículas de polvo a temperaturas por debajo del punto de fusión. Se da tanto en la metalurgia de polvos como en la cerámica. La sinterización aumenta la resistencia, conductividad y densidad.

Sisal: Fibra de ágave usada para fabricar adobes.

Sistema de gestión medioambiental: La parte del sistema general de gestión que incluye la estructura organizativa, responsabilidades, prácticas, procedimientos, procesos y recursos necesarios para definir y ejecutar la política medioambiental DOCE 30.4.93. // Es una forma sistemática y planificada de gestionar los aspectos ambientales de la empresa, que puede ser propio de una empresa o adaptado a normas internacionales.

Slats: Son utilizados como piso para los corrales de cerdos y tienen como función facilitar la limpieza de los suelos para evitar la acumulación de deyecciones y la probabilidad de infecciones en los animales.

SME (soya/sunflower methyl ester): Éter metílico de aceite de soja o girasol.

S-Metil-Dametron: Insecticida y acaricida organofosfórico usado en el control de los áficos y arañas rojas que atacan las cosechas agrícolas y hortícolas; es venenoso para los vertebrados.

Smog: Originariamente, es una contracción de las palabras inglesas *smoke* (humo) y *fog* (niebla), que caracterizó los periodos de aire contaminado en Londres, Glasgow, Manchester y muchas otras ciudades de Gran Bretaña; la palabra fue empleada por primera vez por H.A. De Voeux en 1905. El Gran *Smog* londinense de 1952 causó 4.000 muertos y dio paso a las Actas del Aire Limpio de 1956 y 1958, que tratan de evitar la generación de humos de combustión sin especificar las áreas. La palabra *smog* ha sido aplicada desde entonces a los efectos de otros aires contaminados, no necesa-

riamente relacionados con los humos, como el *smog* de Los Angeles, que se originó a partir de los óxidos de nitrógeno e hidrocarburos expulsados por los vehículos a motor y la acción fotoquímica de la luz solar.

***Smog* fotoquímico:** Mezcla de gases que se forman en los niveles bajos de la atmósfera cuando los rayos del sol actúan sobre los óxidos de nitrógeno y sobre los hidrocarburos emitidos por vehículos. Los NOx son precursores y actúan en estas reacciones químicas de oxidación alterando la composición de la atmósfera, y el ozono es el principal resultante de las reacciones fotoquímicas. La intensidad del *smog* está relacionada con la concentración de ozono en las capas inferiores de la atmósfera. Los efectos del *smog* fotoquímico son la irritación de los ojos, fosas nasales, bronquios, etc.

SO: También dióxido de azufre. Véase *Anhídrido sulfuroso.*

Sobrecarga: Clarea de piedras y suelo en una zona antes de desarrollar en ella una actividad minera.

Sobreexplotación: Explotación de los recursos naturales biológicos a unos niveles incompatibles con su utilización sostenible.

Sobreexplotación de acuíferos: Extracción de agua de un acuífero a una tasa mayor que la de recarga natural.

«Soft organics»: Material orgánico proveniente de plantas o animales y que generalmente es tratado usando procesos tecnológicos convencionales. La presencia de productos de limpieza, desinfectantes, pesticidas o antibióticos pueden conducir a impactos negativos en el proceso de tratamiento.

Sol: Sistema coloidal formado por partículas sólidas o líquidas, en el que siempre el medio de dispersión es un líquido. Los soles pueden ser liófilos (afinidad entre la fase dispersa y la dispersante) o liófobos (no hay afinidad entre ellas).

Solidificación: Conjunto de técnicas que encapsulan el residuo sólido en una forma monolítica de alta rigidez estructural.

Sólidos disueltos: Material orgánico e inorgánico contenido en el agua. Excesivas cantidades de sólidos disueltos pueden convertir el agua en no válida para el consumo humano o para procesos industriales.

Sólidos en suspensión: Sólidos dispersos de manera uniforme en el agua.

Sólidos suspendidos totales: Medida de los sólidos suspendidos en el agua residual, efluentes o medios acuáticos. Se miden con el «test de sólidos suspendidos y no filtrables».

Sólidos suspendidos: Pequeñas partículas sólidas contaminantes que flotan o están suspendidas en aguas residuales u otros líquidos. Se eliminan por centrifugación.

Sólidos volátiles (SV): Materias, generalmente orgánicas, que pueden separarse de una muestra por calentamiento, generalmente a 550ºC, y dejan residuos sólidos inorgánicos no volátiles (cenizas).

Solución: Ver *disolución*.

Solución tampón: Es una solución cuyo pH varía muy poco. Es muy útil para llevar a cabo procesos en los que el pH deba permanecer sensiblemente constante.

Soluto: Componente de una solución que se considera disuelto en un disolvente.

Solvay, método: Proceso para la obtención del bicarbonato sódico sólido.

Solvente: Agente capaz de disolver.

Sondeo: Prospección de un sistema (por ejemplo la atmósfera o el subsuelo) mediante algún instrumento que suministra datos o materiales que permiten evaluar la presencia, concentración, calidad o estado de un recurso natural.

Sonido: Impresión producida en el órgano del oído por las vibraciones elásticas de un cuerpo que se propagan en todos los medios materiales en forma de ondas.

Sonificación: Sistema que genera ultrasonidos en las aguas residuales para la rotura de las paredes celulares.

Sonómetro: Instrumento que se usa para medir la intensidad de un sonido.

Sonoquímica: Tecnología ultrasónica (aplicación del ultrasonido) que provee una excelente forma de energía para modificar las reacciones químicas. Su acción limpiante es mucho más eficiente que las normalmente usadas, como la temperatura y la luz.

Soplante: Aparato que impulsa aire a través de una conducción al final de la cual hay rejas de difusión situadas al fondo del reactor biológico.

Sorción, procesos de: En tratamiento de gases, se denomina sorción al fenómeno fisicoquímico de transferencia de un componente desde una fase gaseosa hasta otra sólida o líquida. Cuando la transferencia de materia se realiza desde la fase gaseosa hasta la fase sólida, el proceso se llama adsorción. Absorción es cuando la transferencia es de la fase gaseosa a la fase líquida. El término desorción hace referencia a la extracción del contaminante del material adsorbente (por ejemplo, la desorción del carbón activo una vez saturado).

Sorel, cemento: Ver *cemento Sorel*.

Sorgos: (Sorghum spp.) Género de unas 20 especies de gramíneas oriundas de las regiones tropicales y subtropicales de África oriental. Su resistencia a la sequía y al calor lo convierte en un cultivo importante en regiones áridas, y es uno de los cultivos alimentarios más importantes del mundo.

Sostenibilidad: Una característica de un proceso o estado que se puede mantener indefinidamente/ Capacidad de satisfacer las necesidades de actuales generaciones sin disminuir el potencial de las generaciones futures para satisfacer las suyas propias.

Spirulina: (o Arthrospira) Es una microalga perteneciente al grupo Cyanobacterium. Se trata de organismos con organización procariota, pero mucho más compleja que la de las bacterias.

Sputtering: Electro deposición. Se trata de un proceso para depositar un material, que se vaporiza, sobre otro en capa fina.

Stripping: Proceso en el que se «arrastra» un componente nocivo en una corriente de vapor (u otro flujo).

Subálveo: Agua subterránea bajo el cauce de un río.

Subproducto: Los residuos que se obtienen en un proceso de producción, con un valor más reducido que el del género principal y que se pueden utilizar directamente como materias primas de otras producciones o como sustituto de productos comerciales. Pueden ser recuperables sin necesidad de someterlos a operaciones de tratamiento. Con las presiones ecológicas, muchos de los subproductos que antes generaban contaminación por vertidos son ahora objeto de aprovechamiento integral vía reciclado// Es el residuo que se utiliza como sustituto de un producto comercial o una materia prima cuando su reutilización es posible sin necesidad de someterlo a operaciones de tratamiento significativas.

Subsidencia: Movimiento descendente de una capa de aire sobre una extensa zona, este fenómeno provoca estabilidad en la atmósfera. El término, también hace referencia las masas de los continentes.

Subsidiariedad: En la UE, la Comunidad intervendrá, según el Tratado de la Unión Europea, sólo en la medida en que los objetos de la acción pretendida no puedan ser alcanzados de manera suficiente por los estados miembros y por consiguiente, puedan lograrse mejor debido a la dimensión o a los efectos de la acción contemplada a nivel comunitario.

Substrato: Se refiere al medio de cultivo cuando se utilizan contenedores o tiestos. Para plantas en el suelo, el término utilizado es, precisamente, suelo. Las plantas en el suelo no están sujetas a unas condiciones tan críticas como las que están en contenedores. Por ello las características de los substratos deben ser objeto de un estudio y control mucho más exactos.

Subsuelo: Conjunto de terreno que hay debajo del suelo.

Suctorios: Microorganismos parásito, protozoo, comunes en agua y suelo.

Suelo contaminado: Suelo que, por el uso que se hace o que se ha hecho, contiene contaminantes en concentraciones superiores a las que le serían propias y que afectan sus funciones y suponen un riesgo para las personas o ecosistema.

Suelo, clasificación del: Hay dos grandes sistemas de clasificación: a) basado en el concepto de zonalidad, en el que se encuentran suelos que pueden asociarse con regiones particulares o zonas climáticas —Orden I Zonal (corresponden aproximadamente a zonas climáticas), Orden II Intrazonal (inciden más las condiciones locales) y Orden III Azonal (suelos jóvenes)—. b) La US Seventh Aproximation (1960) proporciona diez órdenes mayores, basados en el estado actual de desarrollo de los suelos —Entisoles, Vertisoles, Inceptisoles, Aridisoles, Mullisoles, Podsols, Alfisoles, Ultisols, Oxisols y Histosoles—.

Surfactantes: (del inglés surfactant= surface active agent). Agentes superficialmente activos que tienen una estructura molecular característica que consiste, por un lado, en un grupo con muy pequeña atracción por el disolvente (grupo liofóbico, o hidrofóbico cuando el disolvente es el agua) y por otro lado, de un grupo que tiene fuerte atracción por el disolvente (grupo liofólico o hidrofílico cuando el solvente es agua).

Sulfatos: Sales del ácido sulfúrico. Se producen cuando actúa el ácido sobre ciertos metales, óxidos metálicos, hidróxidos o carbonatos.

Sulfuro: Sales del ácido sulfhídrico

Sulfuro de hidrógeno: En solución ácido sulfhídrico. Es un gas tóxico de olor inconfundible a huevos podridos. Se origina en la descomposición bacteriana de la materia orgánica. Fórmula H_2S.

Sumidero: Se entiende cualquier proceso, actividad o mecanismo que absorbe un gas de efecto invernadero, un aerosol o un precursor de un gas de efecto invernadero de la atmósfera.

Superconductividad: Se denomina superconductividad a la capacidad intrínseca que poseen ciertos materiales para conducir corriente eléctrica con resistencia y pérdida de energía cercanas a cero en determinadas condiciones normalmente en condiciones de bajas temperaturas. Esta propiedad fue descubierta en 1911 por el físico holandés Heike Kamerlingh Onnes, cuando observó que la resistencia eléctrica del mercurio desaparecía cuando se lo enfriaba a 4 Kelvin (-269 °C).

Superconductores: Son todos aquellos materiales que poseen la capacidad intrínseca para conducir la corriente eléctrica presentando resistencia y pérdidas de energía cercanas a cero en condiciones básicamente de bajas temperaturas, que se consigue en los materiales más comunes enfriándolos con helio líquido.

Superfondo: Término que se refiere a la dotación económica que recibieron, en EE UU, las leyes «Ley General de Compensación y Responsabilidades de Respuesta Medioambiental**:** CERCLA» y «Ley de Enmiendas y Reautorización de Superhondos**:** SARA», que permitieron el saneamiento de muchos suelos contaminados.

Superfosfato: Fostafo de calcio monobásico obtenido industrialmente por la acción del ácido sulfúrico sobre el fosfato de calcio tribásico y que se utilizan principalmente en la agricultura y son una causa importante de contaminación de los suelos por los metales pesantes y metaloides tóxicos y de eutrofización de las aguas.

Suspensión: El reparto de partículas sólidas de diámetro inferior a 10-5 μm en medios líquidos. Sistema en que las partículas más densas y de tamaño al menos visible al microscopio se hallan distribuidas a través de un líquido o gas menos denso siendo impedida su sedimentación sea por la viscosidad del líquido o por los

impactos de sus moléculas sobre las partículas en cuestión.

«Syngas»: Contracción de «*synthesis gas*». Nombre que se le da a una mezcla de gases que contienen una cantidad variable de monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrocarburos e hidrógeno, generados por la gasificación de materia orgánica. Tiene un poder calorífico considerable. Es empleado también como un intermediario en la producción de petróleo sintético para usarlo como aceite o lubricante. Posee la mitad de la densidad energética del gas natural.

Tacómetro: Instrumento que sirve para determinar la velocidad de giro.

Tagasaste: Leguminosa arbustiva endémica en las islas Canarias (España), de la familia *Fabaceae (Genistae)*, es un vegetal empleado para la recuperación de suelos degradados, dado su carácter leguminoso.

Taladrina: Emulsión de agua, aceite y aditivos, de aspecto lechoso, que se utiliza como lubricante y refrigerante, especialmente en el tratamiento y mecanización de metales.

Talco: Silicato magnésico hidratado. Se emplea en pinturas, cerámica, papel e industria del caucho.

Talud: Superficie del terreno con un fuerte incremento de la pendiente.

Tamices moleculares: Son intercambiadores de iones de silicato de aluminio, cuyo tamaño de poro depende del tipo de catión presente. Los preparados comerciales de estos materiales están disponibles en tamaños de partícula de 40/60 mesh a 100/120 mesh. Los tamices se clasifican según el diámetro máximo de las moléculas que pueden penetrar en los poros.

Tamiz: Aparato estático o dinámico provisto de agujeros de una medida determinada (luz) que se utiliza para retener materias en suspensión que contienen las aguas residuales o simplemente para clasificar los materiales sólidos por tamaño.

Tampones: Un sistema fluvial se dice que tiene «capacidad tampón» cuando a pesar del vertido de productos de carácter ácido, sus aguas no se acidifican. Los elementos resistentes suelen ser los carbonatos.

Tanino: sustancia vegetal natural biodegradable. Se emplea en procesos de curtición. Da como resultado una piel menos suave que la obtenida por el procedimiento químico. La preparación de pieles requiere entre 2 y 4 meses.

Tanque de coagulación y floculación: Depósito donde tiene lugar la coagulación-floculación.

Tanque de decantación: Véase *Decantador*.

Tanques de sedimentación: Depósitos para la depuración mecánica de materias no disueltas que flotan en aguas residuales. Al depósito fluyen las aguas sucias de un alcantarillado y, una vez en reposo, se depositan las materias pesadas, las cuales pueden extraerse una vez seco del depósito.

Tapioca: El almidón de cassava o tapioca se obtiene de las raíces de la mandioca o de la yuca.

Tarifa de máxima demanda supuesta, mixta, nocturna y única: Forma de tarifa binómica en la que la parte fija es proporcional a la máxima demanda de kilovatio que se supone será hecha. // Tarifa del suministro eléctrico dividido en dos partes: una carga fija calculable por año, y una carga variable correspondiente a la cantidad de energía eléctrica efectiva consumida en un periodo fijo. // Modalidad de la tarifa eléctrica doméstica habitual que consiste en que los consumos que se realicen de noche tienen un descuento del 55% en el precio del kilovatio hora. Por el contrario, los que se realicen de noche, además, la demanda de la potencia es libre y puede superarse la potencia contratada por el día. // Tipo de tarifa de energía eléctrica en el cual se efectúa un solo cargo, por ejemplo, un precio fijo por unidad consumida.

Taxon, taxón: Unidad sistemática en la clasificación de plantas y animales, o de sus agrupaciones, de cualquier rango.

Taxonomía: Ciencia de la clasificación.

TCDD: Tipo de dioxina. Isómero 2,3,7,8 tetraclorodibenzodioxina, componente específico del Agente Naranja y el isómero implicado en el desastre de Seveso. Ver *dioxina*.

TCE (Tricloroetileno): Líquido incoloro, no inflamable, de aroma más bien dulce y sabor dulce ardiente. Se usa principalmente como disolvente para eliminar grasa de partes metálicas, aunque también es un ingrediente en adhesivos, líquidos para eliminar pintura y para corregir escritura a máquina y quitamanchas. El TCE no se encuentra en forma natural en el medio ambiente, sin embargo se ha encontrado en fuentes de aguas subterráneas y aguas superficiales como consecuencia de su manipulación, uso y disposición.

TCF: *Totally chlorine free* o cloro libre total. Abreviación que se utiliza para identificar las pastas de papel blanqueadas sin cloro ni compuestos clorados.

TCLP: (Toxicity Characteristic Learching Procedure). Procedimiento de Lixiviación Característico de Toxicidad, utilizado por la USEPA, que está diseñado para determinar la movilidad de la parte orgánica e inogánica presente en un líquido, sólido y/o de un residuo mulifase. Usualmente es usado para determinar si el residuo debe o no ser considerado como peligroso.

TEC: Tonelada Equivalente de carbón: equivalente a: $29{,}3 \cdot 10^9$ J o 0,7027 TEP.

Tecnologías limpias: Conjunto de procesos, técnicas y procedimientos productivos que generan menos residuos y emisiones que las tecnologías utilizadas normalmente en la industria para obtener productos similares. Puede conseguirse mediante cambios radicales en los procedimientos de trabajo, cambios tecnológicos, mejoras en el control de las reacciones, cambio de materias primas, etc.

Tectónica: Parte de la geología que estudia el movimiento de las placas continentales.

Teflón: (procedente de Teflon® de DuPont). Nombre con la que fue comercializado inicialmente), también denominado politetrafluoretileno (PTFE). Es un polímero similar al polietileno, donde los átomos de hidrógeno están sustituidos por flúor. La virtud principal de este material es que es prácticamente inerte, no reacciona con otras sustancias químicas excepto en situaciones muy especiales. Esto se debe básicamente a la protección de los átomos de flúor sobre la cadena carbonada.

Tejido tejano: Tejido de algodón espeso y fuerte, con ligamientos de sarga, que utiliza especialmente para la confección de pantalones, ropa de trabajo, uniformes, etc.

Telémetro: Instrumento que sirve para medir distancias.

Temperatura: Variable de estado directamente proporcional a la energía cinética media de las partículas de un cuerpo. Los aparatos para medir la temperatura son los termómetros, en los que se utiliza un fenómeno físico (por ejemplo, dilatación y contracción del mercurio) dependiente de la temperatura para medirla. Existen distintas escalas y unidades de temperatura. En la escala Celsius o centígrada, se asigna el valor 0 a la temperatura de fusión del hielo y 100 a la de ebullición del agua, ambas a presión atmosférica, y se define el grado centígrado como la centésima parte de esa escala. En la escala de temperatura absoluta o Kelvin el 0 absoluto vale -273,15 ºC. Otras escalas de temperatura son la Reamur y la Fahrenheit.

Tenerías: Nombre que recibían antiguamente las industrias de curtición de cueros animales. Hoy en día aún existen algunas de estas empresas que han conservado este nombre.

Tensión de humedad del suelo: Contenido de humedad del suelo expresado mediante una presión negativa equivalente, igual a la presión a la cual se tendría que someter el agua de un suelo para llegar al equilibrio con una masa de agua de la misma composición, a través de una membrana permeable.

Tensoactivos, compuestos: Sustancia que causa una unión más fácil de un líquido con una superficie. Los compuestos tensoactivos o detergentes son un grupo de cuerpos que tienen la propiedad de dismunuir la tensión superficial de los líquidos en que se hallan disueltos. Favorecen además la formación de espumas, y en las depuradoras dificultan la sedimentación primaria e interfieren en la floculación.

TEP: Tonelada Equivalente de Petróleo. Unidad física de energía correspondiente a la combustión de una tonelada de petróleo (1 tep equivale a 10^7Kcal). Expresa el poder calorífico de otras fuentes de energía en términos de la que tiene 1 tm de petróleo. Como medida de conversión prácticamente ha venido a sustituir a la TEC (Tonelada Equivalente a Carbón).

TEQ: Equivalente tóxico de la mezcla de dioxinas y furanos.

Teratogénico: Véase *Teratógeno*.

Teratógeno: Sustancia que causa malformaciones o serias desviaciones del desarrollo normal de embriones y fetos.

Termal, contaminación: Vertido de agua caliente, resultante de procesos industriales, que afecta negativamente a la vida acuática.

Termia: Medida de energía que equivale a 1.000 Kcal (la unidad norteamericana equivale a 100.000 BTU).

Termoclima: Capa de agua de un lago que se sitúa entre el epilimnon y el hipolimnion. En el termo-clima, la temperatura disminuye rápidamente con el incremento de la profundidad (aproximadamente 1 ºC por metro).

Termoestable: Característica que poseen las sustancias que no se transforman ni se degradan por acción de la temperatura. Por lo general se refiere a una familia de plásticos.

Termófilas, bacteria: Bacteria que trabaja a temperaturas altas.

Termohalina: Circulación de agua salada en los océanos. El agua es más densa cuanto más salada es y se hunde. Todo este movimiento provoca una transferencia de calor y de nutrientes.

Termolizador: Sistema variante de pirólisis a baja temperatura. El reactor es una construcción mecano-soldada, fija, sin uniones dinámicas y posee una base de acero inoxidable refractario.

Termoluminiscencia: Propiedad que presentan algunos minerales de emitir luz cuando se calientan por debajo del rojo.

Termómetro de alcohol: Termómetro de líquido que contiene alcohol etílico.

Termopar: Termómetro constituido por dos cables de naturaleza distinta y soldadas por un extremo. Cuando se acerca la soldadura a una foco de calor se engendra una fuerza electromotriz.

Termoplástico: Materiales plásticos que pueden calentarse hasta fundirse llegando al estado líquido o semilíquido, enduceriéndose de nuevo al enfriarse.

Termosfera: Región de la atmósfera terrestre situada por encima de la mesosfera en que la temperatura aumenta regularmente con la altura.

Termostato: Dispositivo sensible a la temperatura que controla la parada y puesta en marcha del sistema de suministro de calor. Consiste en un aparato que se conecta a una fuente de calor o frío para impedir que la temperatura suba o baje de la prefijada, conectando y desconectando dicha fuente. Termostatos programadores son los que además ofrecen la posibilidad de realizar la programación horaria.

Terpenos: Hidrocarbono. Emisión gaseosa a la atmósfera de origen natural. Fuentes naturales: vegetación (árboles, coníferas, plantas, etc.) Vida estimada 0,04-0,08 días.

Terraza (fluvial): Representan depósitos fluviales de épocas pasadas del mismo río. Después de la sedimenta-

ción de la terraza el mismo río erosiona la terraza. Terrazas normalmente son muy planas con una muy leve inclinación hacia río abajo. Las terrazas se componen de clastos generalmente sueltos, que podrían ser gravas o arenas.

Terrazo: Baldosa hecha de trozos de mármol y arena aglutinados con cemento que se utiliza para hacer pavimentos. También llamados pavimentos hidráulicos.

Test *in vivo*: Experimentos de laboratorio que se llevan a cabo utilizando animales o voluntarios.

Tetrabrick: Tipo de envase ligero utilizado para contener soluciones alimenticias de rápida caducidad. se caracteriza por estar constituido por un material que contiene tres capas de distintos elementos: Plástico film al exterior, cartón al interior y una fina capa de aluminio en su interior. En otras latitudes la cantidad y naturaleza de las capas es diferente.

Tetracloroetileno: Disolvente halogenado utilizado con mucha frecuencia en el desengrase de piezas metálicas y pieles y en la limpieza de fibras textiles.

Tetracloruro de carbono: Sustancia muy volátil presente en disolventes y extintores. Se incluye entre las sustancias peligrosas que originan contaminación al ser vertidas en el medio acuático, Directiva 76/464. Además la Directiva 86/280 fija los diferentes límites de emisión y objetivos de calidad (concentración de CCl4 en las aguas continentales no superior a 12 (g/l a partir del 1 de enero de 1998). Vida estimada 530 días.

Tetrápodo: Consiste en un cuerpo central del cual emergen cuatro patas troncocónicas formando ángulos de 120ºentre sí. Estas unidades se instalan en varias capas superpuestas y hacen uso tanto de su peso como de las condiciones que brinda su forma original para trabarse o engranarse entre ellas por sus patas. Estos elementos han sido empleados para la protección del talud costero.

TG: Análisis termo-gravimétrico, es una técnica que mide la variación de masa en un compuesto en función de la temperatura. Las variaciones de temperatura no siempre implican un cambio en la masa de la muestra; existen sin embargo cambios térmicos que sí se acompañan de un cambio de masa, como la descomposición, la sublimación, la reducción, la desorción, la absorción y la vaporización. Estos cambios pueden ser medidos con el analizador termogravimétrico.

Tiempo de permanencia o residencia: Tiempo necesario para que la mitad de la concentración inicial de un contaminante desaparezca del aire, de las aguas o del suelo.

Tiempo de residencia (TRH): Lapso de tiempo que los gases han de permanecer por encima de determinada temperatura (la legislación fija un mínimo de 850 ℃ para los gases resultantes de la incineración de RSU) durante 2 segundos en una determinada presencia de oxígeno.

Tierra de diatomeas: Sustancia terrosa caliza formada esencialmente por caperuzones de diatomeas, usada por su porosidad como filtro para las aguas. Es un material aislante.

Tierra roja: Arcilla muy roja formada sobre roca calcárea por descarbonatación y rubefacción, que se concentra en cavidades de morfología cárstica, especialmente en los climas mediterráneos.

Tintado: Aplicar una sustancia para cambiar el color original de una cosa, teñir.

Tintorería: Establecimiento especializado en el cuidado y mantenimiento textil. Sus instalaciones están preparadas para limpiar, planchar y mantener sus prendas. Fundamentalmente son dos los métodos de limpieza que se emplean: lavado acuoso y lavado con disolventes o limpieza en seco .

Tioácidos: Sustitución de un átomo de oxígeno, en una molécula, por otro de azufre. Así los mercaptanos son tioalcoholes (RSH).

Tiosulfato sódico: Especie muy reducatora, debido a su capacidad de pasar a sulfato. Su fórmula genérica es ($Na_2S_2O_3$).

TIR: Tasa Interna de Retorno, está definida como la tasa de interés con la cual el valor actual neto o valor presente neto (VAN o VPN) es igual a cero. El VAN o VPN es calculado a partir del flujo de caja anual, trasladando todas las cantidades futuras al presente. Es una herramienta de toma de decisiones de inversión utilizada para comparar la factibilidad de diferentes opciones de inversión. Generalmente, la opción de inversión con la TIR más alta es la preferida

Tiurácilos: Contaminación de alimentos. Antitiroide prohibido en la UE. Utilizado como alimento para los animales, en forma de polvos o mezclado con el pienso, produce en la carne una acumulación de líquidos intracelulares.

Tixotropía: Transformación recíproca sol-gel.

TLV: (Valores Umbrales Límites). Criterios de valoración de contaminantes químicos en el medio ambiente de trabajo que permiten vislumbrar, de un modo orientativo, el potencial tóxico de una sustancia. Son propuestos por la American Conference of Governmental Industrial Hygienist (A.C.G.I.H.). Se definen tres tipos de TLV, en función de la variedad de efectos que las sustancias pueden producir a las personas expuestas.

Toba: Toba calcárea**:** depósito poroso de caliza.

TOC: *Total Organic Carbon*. Representa la cantidad de carbón orgánico presente en las aguas residuales.

Tocón: Resto de tronco que permanece en el suelo una vez el árbol ha sido cortado.

«Todo uno»: Concepto que se refiere a la mezcla de residuos, es decir, tal y como se generan y sin separación en origen.

Toluidina: Sustancia sólida a temperatura ambiente, de p.f 44 ℃ y p.e 200 ℃. Posee una escasa solubilidad en

agua (0,7 g/100 g de agua) y se descompone al calentarla intensamente o al arder, produciendo humos tóxicos, incluyendo óxidos de nitrógeno. Reacciona violentamente con oxidantes, especialmente el ácido nítrico.

Toma: Punto donde se capta el agua que es derivada hacia la central hidroeléctrica.

Tonelada equivalente de petróleo: Ver *TEP.*

Tóner: Mezcla de materiales tipo resina, partículas metálicas, etc., en forma de polvo o en solución líquida, que se utiliza como tinta de fotocopiadoras, máquinas de fax, impresoras térmicas, etc.

Topografía: Características físicas de la superficie de un área incluyendo las elevaciones y relieves naturales o producidos por el hombre.

Tornillo de Arquímedes: Barra metálica y en forma de hélice que, colocada sobre media tubería y en ángulo sobre el horizontal, eleva agua y sólidos al girar sobre su eje.

Torre de absorción: Dispositivo vertical que pone en contacto un líquido y un gas que circulan a contracorriente para favorecer la absorción en el líquido de determinados contaminantes presentes en el gas.

Torre de adsorción: Dispositivo vertical que pone en contacto un sólido y un gas y/o líquido para favorecer la adsorción en el sólido de determinados contaminantes presentes en el gas y/o líquido.

Torrente: Curso de agua temporal, de régimen irregular, característico de las pendientes pronunciadas y de las laderas de montañas por los cuales transcurre en función de las precipitaciones estacionales u ocasionales.

Torta de fangos: Masa de lodos después de someterlos a un proceso de deshidratación, en particular en un filtro prensa.

Tortuosidad: Dificultad que ofrece un medio (suelo, mineral, material de construcción, etc.) al paso de un fluido, por lo general agua.

Tostación: Proceso que se desarrolla en la minería cuando se somete un mineral a temperatura elevada, que permite la eliminación de elementos volátiles (azufre, arsénico, antimonio, selenio, etc.). Se realiza previa a la fusión.

Tostación de la pirita: Calentamiento del mineral en una corriente de aire, que convierte el azufre en dióxido y el metal en óxido. Después de la tostación, el óxido metálico se reduce con carbón y se obtiene el metal.

Toxafeno: Plaguicida clorado muy tóxico incluido entre las 12 sustancia a eliminar que aparecen en el Convenio de Estocolmo.

Toxicidad: Grado de peligrosidad de una sustancia a la vida vegetal o animal o humana. La toxicidad aguda viene determinada por una única toma de un producto (LD50). La toxicidad subcrónica está provocada por la toma repetida de un producto en un periodo relativamente corto comparado con lo que dura la vida del organismo receptor.

Tóxico: Sustancia venenosa o que produce efectos nocivos.

Toxicocinética: Especialidad que trata de cuantificar temporalmente las consecuencias de la introducción de un tóxico en el organismo.

Toxicología: Rama de la ciencia médica que estudia la utilización y efectos de venenos y contravenenos.

Toxina: Sustancia de naturaleza protéica que es muy tóxica. Su composición química es desconocida y su efecto específico. Es un contaminante biológico.

Toxoide: Toxina en la que han sido eliminadas sus propiedades antigénicas (producción de anticuerpos).

TPH (Total Petroleum Hydrocarbons): Hidrocarburos totales de petróleo, son una mezcla de productos químicos compuestos principalmente de hidrógeno y carbono, llamados hidrocarburos. Los científicos han dividido a los TPH en grupos de hidrocarburos de petróleo que se comportan en forma similar en el suelo o el agua. Estos grupos se llaman fracciones de hidrocarburos de petróleo. Cada fracción contiene muchos productos químicos individuales. Algunas sustancias químicas que pueden encontrarse en los TPH incluyen los hexanos, combustibles de aviones de reacción, aceites minerales, benceno, tolueno, xilenos, naftalina, y fluoreno, como también otros productos de petróleo y componentes de gasolina.

Tragamóvil: Campaña organizada por ASIMELEC para recoger y reciclar los teléfonos móviles y sus complementos, ya sea porque están estropeados o porque no se usan. La iniciativa Tragamóvil como sistema pionero de recogida y reciclaje de teléfonos móviles ha conseguido cofinanciación de la Comisión Europea a través de su Programa Europeo LIFE-MEDIO AMBIENTE.

Transesterificación: Procedimiento mas común para la producción de biodiesel. Para llevar a cabo esta reacción, se mezclan en un reactor el aceite extraído y un alcohol (metanol generalmente), en presencia de un catalizador alcalino (NaOH o KOH). Químicamente la transesterificación rompe la molécula del aceite vegetal crudo, convirtiéndose así en un metil alcohol éster o etil alcohol éster (según el alcohol utilizado), más glicerina, muy utilizada en la industria farmacéutica.

Transfronterizo (relacionado con problema o efecto ambiental): Propiedad de la contaminación de atmósfera o agua que puede extenderse y producir efectos adversos lejos del lugar de emisión, muchas veces afectando a diferentes países (p. j. lluvia ácida).

Transgénicos (también llamados organismos genéticamente modificados u OGM):- Organismos a los que se les ha injertado genes de otras especies utilizando técnicas de biotecnología, para generar propiedades ajenas a su estructura natural tales como resistencia al frío, a agroquímicos o a ciertas plagas de insectos. También se introducen frecuentemente otras características, como aumento de pro-vitaminas o inclusión de vacunas.

Transmisión de calor: Transferencia de energía desde un foco caliente a otro frío a través de diversas capas. La transmisión de calor puede llevarse a cabo en régimen estacionario (o continuo) o variable. El calor es transferido entre objetos por diferentes mecanismos: radiación, conducción y convección.

Transmutación: Reacción nuclear que consiste en la conversión de un elemento químico en otro.

Trass: Material puzolánico natural que se encuentra en la región renana, en Alemania, que se utiliza para obtener cementos de marcada durabilidad y que proporciona una resistencia adicional a los morteros y hormigones, por fijación de la cal liberada de la hidratación del cemento pórtland.

Tratamiento: conjunto de operaciones cuya finalidad es la eliminación o reducción de la contaminación o características no deseables.

Tratamiento a final de línea: Tratamiento de los efluentes, residuos, emisiones, etc., aguas abajo del proceso productivo que los ha generado, generalmente dentro del mismo establecimiento industrial donde tiene lugar el proceso, con el objetivo de acondicionarlos para su vertido.

Tratamiento biológico: Tecnología que utiliza bacterias para eliminar contaminantes. Mediante este tratamiento la materia orgánica se descompone.

Tratamiento de residuos: Operación o conjunto de operaciones de cambio de las características físicas, químicas o biológicas de un residuo para reducir o neutralizar las sustancias peligrosas que contiene, recuperar materias o sustancias valorizables, facilitar su uso como fuente de energía o favorecer su eliminación.

Tratamiento fisicoquímico: Proceso generalmente utilizado en plantas de tratamiento de aguas residuales. Mientras que el tratamiento físico incluye métodos como aireación o filtración, el tratamiento químico se refiere a procesos de coagulación, cloración y adición de ozono. El mismo término se utiliza también en tratamiento de productos tóxicos en aguas superficiales o subterráneas, vertidos de crudo y residuos peligrosos depositados en el suelo.

Tratamiento primario: Proceso de una estación depuradora de aguas residuales que consiste, normalmente, en una decantación con el fin de eliminar la materia en suspensión.

Tratamiento secundario: Segunda fase del proceso de depuración de las aguas residuales, que consiste en eliminar los contaminantes orgánicos mediante la aplicación de un tratamiento biológico u otro tipo de tratamiento alternativo.

Tratamiento terciario: Cualquier proceso físico, químico o biológico, utilizado para conseguir un grado de calidad superior al obtenido mediante un tratamiento secundario.

Travertino: Material calcáreo depositado por las fuentes. Si es poroso se denomina toba calcárea.

Traza: Cantidad muy pequeña de un constituyente.

Trazabilidad alimentaria: es el seguimiento que se hace a un compuesto dentro de la cadena de alimentaria.

Trazador: Sustancia química a la que se añade un radionucleido para formar un radiotrazador de forma que pueda ser detectado a lo largo de un proceso.

Trementina: Jugo casi líquido, pegajoso, y de sabor picante, que fluye de los pinos, abetos, alerces y te.

Tremolita: es un mineral perteneciente al grupo de los silicatos. Más concretamente, pertenece a los amfibolos y al grupo del asbesto. Se forma por metamorfosis a partir de sedimentos ricos en dolomita y en cuarzo. Pertenece a la misma serie que actinolita y ferro-actinolita.

Triásico: Primer periodo de la era Mesozoica, de unos 35 millones de años de duración (de 230 a 195 millones de años a.C.) que antecede al jurásico.

Triboeléctrico, efecto: Fenómeno eléctrico donde ciertos materiales se cargan eléctricamente después de entrar en contacto con otros materiales de diferente naturaleza. La polaridad y la fuerza de las cargas producidas difieren según suavidad del material y de la superficie. El ámbar, por ejemplo, puede adquirir una carga eléctrica por la fricción.

Triboluminiscencia: Propiedad que presentan algunos minerales de emitir luz cuando son molidos, rayados o frotados.

Triclorocarbonilida: Se usa como germicida en los jabones de baño. Es de baja toxicidad.

Tricloroetano: CHCCl. Metil cloroformo. Líquido estable, de bajo punto de ebullición e incoloro y tóxico al ser inhalado. Se utiliza como disolvente y como agente desengrasante de metales así como otras instalaciones industriales. Es un disolvente clorado de baja toxicidad (mas baja que la del tetracloruro de carbono) y no inflamable.

Tricloroetileno (TCE): $CHCl=CCl_2$. Derivado del acetileno, se utiliza como disolvente en el lavado en seco, en la extracción de la grasa de la lana y en la fabricación de pinturas y barnices. También tiene aplicaciones en la cirugía para anestesia. El nombre comercial registrado es trilene. Clasificado según las Directivas 86/280, 88/347 como sustancia peligrosa.

Triclorometano: Compuesto orgánico volátil con propiedades anestésicas (fue el primer anestésico descubierto) y de disolvente orgánico (se utiliza para disolver y extraer compuestos orgánicos). Fórmula $CHCl_3$.

Tridimita: Forma nativa, incolora o blanca, de sílice pura; no es tan abundante como el cuarzo. El cuarzo se transforma parcialmente en tridimita al aumentar la temperatura por encima de los 800 ℃.

Trifenil policlorado: Compuesto organoclorado formado por tres anillos enlazados de fenil y entre uno y catorce átomos de cloro que sustituyen los hidrógenos.

Trifosfórico: Tubos recubiertos en su interior por una sustancia fluorescente de alta emisión luminosa. Emiten luz en tres bandas espectrales de los colores fundamentales: azul, verde y rojo. Tienen una alta eficacia luminosa.

Triglicéridos: Éteres naturales de grasas y aceites, que son los principales constituyentes de las grasas y los aceites.

Trihalometano: Uno de los compuestos orgánicos derivados del metano. Es un subproducto de la cloración del agua potable que contiene material orgánico. Es tóxico.

Trilene: Véase *Tricloroetileno.*

Trilobites: Organismos simples muy antiguos pero de enorme trascendencia para la evolución de las especies en el planeta.

Trinchera: Término empleado en la fabricación del compost para designar las pilas alineadas que se hacen de material en fermentación.

Trípoli: Roca silícea fácilmente reducible a polvo, empleada para pulimentar vidrio, metales y piedras duras, y que, mezclada con la nitroglicerina, sirve para fabricar la dinamita. Tiene propiedades puzolánicas.

Triquitas: Ver *whiskers.*

Tritio: Isótopo del hidrógeno.

Triturador: Máquina que sirve para reducir el tamaño de los materiales.

Tromel separador: Criba cilíndrica giratoria para separar por tamaños los productos triturados (de una cantera o explotación minera).

Trómel: Colador que consiste en un cilindro con orificios de un diámetro determinado y que separa los sólidos mediante un movimiento de rotación.

Tronadura: Ver *voladura*.

Tropopausa: Final de la troposfera, en el límite con la estratosfera.

Troposfera: Capa de la atmósfera situada sobre la superficie terrestre que se caracteriza por contener aire húmedo. Llega, aproximadamente, hasta los 10 kilómetros y en ella se desarrollan los fenómenos meteorológicos y la mayor parte de los procesos de la dinámica atmosférica. El calentamiento del aire en la troposfera tiene lugar por irradiación del calor de la tierra, por lo que la temperatura disminuye con la altura con relación a unos 6,5 ºC cada kilómetro.

Troposférico: Perteneciente o relativo a la tropósfera que corresponde a la capa inferior de la atmósfera, más cercana a la superficie. Desde el suelo hasta una altura de 12 kilómetros.

Tubérculo: Tallo subterráneo engrosado que acumula sustancias de reserva.

Tubería de descarga: Tubería que conduce la totalidad del agua o los lodos y da a cada parte el destino y el uso convenientes.

Tundra: Biomasa dominado por líquenes, musgos y hierba que se encuentra en las latitudes altas (tundra ártica) y algunas elevadas (tundra alpina). La tundra ártica está permanentemente helada. Aparece en clima subglacial.

Turba: Combustible fósil formado de residuos vegetales acumulados en sitios pantanosos, de color pardo oscuro, aspecto terroso y poco peso, y que al arder produce humo denso. // Estiércol mezclado con carbón mineral que se emplea como combustible en zonas poco desarrolladas y como soporte en actividades agrícolas. En la UE está prohibida la extracción de turba // Son materiales de origen vegetal a partir de su descomposición, de propiedades físicas y químicas variables en función de su origen. Tiene un color pardo negruzco. Está formado por una masa esponjosa y ligera en la que aún se aprecian los componentes vegetales que la originaron. Se emplea como combustible y en la obtención de abonos orgánicos.

Turbera: Formación palustre con acúmulo de material vegetal donde crecen los esfagnos (musgos del género *Sphagnum*). La carencia de oxígeno hace que la descomposición de la materia orgánica produzca turba, que contiene un 60% de carbono y es utilizable como combustible.

Turbidez: Reducción de la transparencia del agua a causa de la presencia de materia no disuelta.

Turbidímetro: Fotocolorimetro adaptado para la medida de la turbidez de una suspensión a partir de la diferencia de su transmitancia con el disolvente.

Turbina: Elemento mecánico que se encarga de transformar la energía cinética y potencial del agua (o vapor) en energía mecánica de rotación transmitida a un eje.

Turbulencia: Neblina en el aire causada por la presencia de partículas y contaminantes. También se denomina con el mismo nombre el proceso similar que se origina en el agua debida a la materia orgánica o a sedimentos.

UICN: La Unión Mundial para la Naturaleza, fundada en 1948, agrupa a 79 estados, 112 agencias gubernamentales, 735 ONGs, 35 afiliados, y alrededor de 10.000 científicos y expertos de 181 países en un partenariado único a nivel mundial. Su misión es influir, animar y asistir a la sociedad a conservar la integridad y diversidad de la naturaleza y asegurar que cualquier uso de los recursos naturales sea ecológicamente sostenible. La UICN ha ayudado a más de 75 países a preparar e implementar estrategias nacionales de conservación de la biodiversidad. Aproximadamente unas 1.000 personas forman el personal de UICN, localizado en su mayoría en sus 42 oficinas regionales y de países, mientras que unas 100 personas trabajan en la sede de UICN en Gland (Suiza). Ver http://www.iucn.org.

Ultrafiltración: La separación de partículas coloidales por filtración, mediante aspiración o presión, a través de un filtro coloidal o membrana semipermeable.

Ultrasonido: Ondas de sonido que, debido a su tono muy alto ~~su~~periores a 18 Kilohertz~~, no~~ pueden ser captadas por el oído humano.

Ultravioleta: Radiación electromagnética invisible, muy eficaz en el tratamiento de aguas residuales. En el proceso de desinfección del agua es utilizada como desinfectante físico. La luz ultravioleta producida por lámparas de vapor de mercurio se emplea principalmente para desinfectar las aguas claras. Las frecuencias producidas por lámparas ultravioletas normales tienen un efecto germicida equivalente al 85% del máximo posible que se puede ejercer sobre bacterias, hongos y virus.

Umbral: Valor mínimo de tensión, corriente, estímulo, etc. que determina la respuesta detectable.

Umbral de dolor: Nivel máximo de presión acústica que puede soportar un sujeto sin sufrir un trauma acústico irreversible.

UNCED: *United Nations Conference on Environment and Development*. Conferencia de las Naciones Unidas sobre medio ambiente y desarrollo (Río de Janeiro, Junio de 1992).

UNEP: *United Nations Environmental Program*. Organismo de la ONU constituido en 1972 después de la Conferencia Internacional sobre medio ambiente realizada el mismo año en Estocolmo.

UNESCO: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. Agencia especializada de las Naciones Unidas creada en 1956, está integrada por 138 miembros. Sus objetivos son promover la paz internacional y el bienestar común de la humanidad, a través de relaciones culturales, científicas y educativas.

UPC: Universidad Politécnica de Cataluña. Institución académica de carácter público ubicada en diferentes ciudades, en particular Barcelona.

Uralita: Hornblenda uralítica. Silicato complejo.

Urbanismo: Conjunto de métodos económicos, sociológicos y arquitectónicos para el diseño del espacio urbano con el propósito de crear condiciones adecuadas de vivienda, tráfico, medio ambiente, esparcimiento, además de las áreas necesarias con fines de implantación industrial, comercial. etc.

Ureaformaldehido: Tipo de resina de formaldehído.

USEPA: United States Environmental Proteccion Agency, es el organismo de Estados Unidos que tiene como misión proteger la salud de las personas y el medio ambiente. Comenzó trabajando el año 1970. Véase *EPA*.

Uso del suelo: Destino de una parcela, un área, etc., a cultivos, vías de comunicación, edificaciones, etc.

Uso sostenible: El que se hace de un organismo, ecosistema u otro recurso renovable dentro de los límites de su capacidad de renovación.

Utilización sostenible: Se entiende la utilización de componentes de la diversidad biológica de un modo y a un ritmo que no ocasione la disminución a largo plazo de la diversidad biológica, con lo cual se mantienen las posibilidades de ésta de satisfacer las necesidades y las aspiraciones de las generaciones actuales y futuras.

Vaguada: Terreno entre laderas o vertientes por el que circula o puede circular el agua en periodos de avenida.

Vahos: Vapores que despiden los cuerpos en determinadas condiciones.

Valencia: Número de átomos de hidrógeno que pueden unirse o sustituirse por un átomo correspondiente de un elemento.

Valor guía: Concentración de contaminantes que se considera tolerable, notablemente inferior a los valores límites y que se pueden considerar el nivel máximo posible en zonas o espacios especialmente protegidos.

Valor límite: Niveles máximos admisibles para vertidos (cantidades vertidas por unidad de tiempo), para concentraciones de sustancias en un vertido o en el medio ambiente (aire o agua), o en productos de consumo.

Valorización: Conjunto de operaciones que tienen el objetivo que un residuo vuelva a ser utilizado, total o parcialmente.

Válvula antirretorno: Válvula que deja pasar el fluido en un único sentido.

VAN: Valor actual Neto o Valor Presente Neto son términos que proceden de la expresión inglesa Net Present Value. El acrónimo es NPV en inglés y VAN en español. Es un procedimiento que permite calcular el valor presente, de un determinado número de flujos de caja futuros. El método, además, descuenta una determinada tasa o tipo de interés igual para todo el periodo considerado. La obtención del VAN constituye una herramienta fundamental para la evaluación y gerencia de proyectos, así como para la administración financiera.

Van der Waals: Físico Holandés, recibió el premio Nóbel el año 1910. Es conocido por la ecuación del estado de los gases reales y el descubrimiento de las fuentes de atracción débiles superficiales (de adsorción).

Van der Waals, enlaces de: Ver *Fuerzas de Van der Waals.*

Vaporización: Paso del estado líquido al estado gaseoso.

Vatio (w): Unidad de potencia eléctrica en el sistema basado en el metro, el kilogramo, el segundo y el amperio. Equivale a un julio por segundo. Un CV (caballo de vapor) equivale a 736 vatios.

Vatio hora (wh): Unidad de trabajo o energía equivalente a la energía producida o consumida por una potencia de un vatio durante una hora. Un kWh equivale a 860 Kcal.

Vector ambiental: Medio transmisor de agentes contaminantes.

Vega: Suelos de llanuras fluviales.

Vegetación halófita: Formada por plantas que toleran distintos niveles de salinidad. Frecuentes en zonas costeras bajas con marismas y salinas y en las lagunas saladas interiores.

Vegetación nitrófila: Vegetación formada por plantas que crecen en ambientes ricos en nitrógeno, como son muchas áreas de influencia humana.

Vegetación riparia: Vegetación típica de las riberas de ríos y arroyos. Jalonando los cursos de agua, esta vegetación da lugar a formaciones lineales de interés paisajístico y climático. Transversalmente se distinguen zonas de vegetación que van desde las plantas parcialmente sumergidas, hasta las formaciones arbóreas y arbustivas del bosque en galería.

Vehículos híbridos: Llamado también vehículo eléctrico híbrido. Es un vehículo en el cual la energía eléctrica que lo impulsa proviene de baterías alimentada, a su vez, por un motor de combustión interna que mueve un generador. Normalmente, el motor también puede impulsar las ruedas en forma directa. El motor térmico es la fuente de energía que se utiliza como última opción, y se dispone un sistema electrónico para determinar qué motor usar y cuándo hacerlo. La combinación de un motor de combustión operando siempre a su máxima eficiencia y la recuperación de energía del frenado (útil especialmente en la ciudad), hace que estos vehículos alcancen mejores rendimientos que los vehículos convencionales.

Velocidad ascensional: Cociente entre el caudal que entra en el decantador y su superficie.

Velocidad de infiltración: Velocidad con la que el agua subterránea entra en una acequia o galería de infiltración, un drenaje, una alcantarilla o cualquier conducto enterrado.

Ventilación: Suministro de aire local. También la introducción de oxígeno en la pila de compost.

Ventilación cruzada: Proceso de intercambio de aire del interior de una vivienda por aire fresco del exterior facilitándose una circulación de éste al interior, que se consigue sin el uso de equipos mecánicos que consuman energía tales como acondicionadores de aire o ventiladores, si no que la edificación y los componentes constructivos deben orientarse convenientemente; también deben disponerse aberturas y ventanas que la promuevan.

Vermicompostaje: Transformación de un producto orgánico parcialmente estabilizado, como las heces o el compost, por la acción de determinados tipos de lombrices**. /** Es una técnica de compostaje que utiliza la capacidad de las lombrices para tratar los residuos orgánicos generando un producto, el humus de lombriz, muy apreciado en el mercado.

Vermiculita: Silicato de estructura exfoliada en láminas entre las cuales se aloja el aire, lo que lo convierte en un gran aislante térmico. // Es un mineral formado por silicatos de hierro o magnesio, del grupo de las micas. Se utiliza como sustrato en cultivos hidropónicos, como árido para elaborar hormigones de baja densidad, como aislante térmico y acústico, en extintores, como elemento filtrante, como protección de materiales o equipamientos frágiles, para aumentar la viscosidad de aceites lubricantes, como absorbente de humedad y otras contaminaciones líquidas y como excipiente en productos diversos, incluyendo medicamentos, entre otros usos.

Vermífugo: Sustancia que tiene la propiedad de matar o expulsar las lombrices intestinales.

Vertedero controlado: Zona de almacenamiento de RSU o de RI sobre el terreno, dispuesta de forma tal que se eviten molestias y riesgos para la salud pública durante las operaciones de vertido y después de su clausura.

Vertedero de alta densidad: Se llega a obtener una densidad de 1.000 kg/m^3 mediante equipos de alto poder de compactación concebidos para tal efecto. No es necesario cubrir con frecuencia las capas. Permite gran evaporación, disminución de la generación de lixiviados, reduce la fermentación aerobia (generadora de malos olores) y no atrae a roedores.

Vertedero de baja densidad: Los residuos se esparcen mediante una pala cargadora o cadenas y se produce un compactado y desgarro débil llegando a 500 kg/m^3. Debe cubrirse con tierra diariamente para evitar la presencia de roedores, olores y esparcimiento por el aire de los productos ligeros. Se consiguen densidades cercanas a 700 si la compactación es buena.

Vertedero de mediana densidad: Utiliza máquinas compactadoras diseñadas especialmente para esta labor llegándose a densidades de 800. No precisa cubrición diaria. Este tipo permite el tránsito de vehículos de recogida, la evaporación de parte de los residuos reduce la generación de lixiviados y se atenúan los malos olores al existir una fermentación aerobia.

Vertedero: Lugar donde se depositan productos residuales. En caso de vertedero controlado se realiza la impermeabilización del terreno, la comprensión de basuras y su posterior cubrimiento y la canalización para extraer los lixiviados para su posterior tratamiento. Así mismo, se colocan tubos de salida de biogás. Éste, de acuerdo con la normativa europea, se debe valorizar o destruir en una antorcha. En hidraúlica por vertedero se entiende el punto de salida de agua.

Vertido: Emisión de un sólido o líquido que, por cualquier medio va a parar al medio terrestre, al medio acuático o bien a una infraestructura de saneamiento.

Vertisoles: Suelos ricos en ciertos minerales de arcilla que se dilatan y rompen con los cambios de humedad a lo largo de las estaciones, invirtiéndose y mezclándose los horizontes.

VFU: Es la sigla para denominar, en España, a los «Vehículos Fuera de Uso».

Vibración: Movimiento de una partícula de un medio elástico alrededor de su punto de equilibrio provocado por una fuerza.

Vicat, aguja de: Penetrómetro en forma cónica que se introduce en el terreno para comprobar su resistencia.

Vida media: O valor medio de la vida de todos los átomos radioactivos considerados. Es la inversa de la constante de desintegración.

Vidrio: Líquido sobreenfriado duro, amorfo y quebradizo, fabricado mediante fusión de óxidos de sílice, boro o fósforo con otros óxidos básicos (sodio, magnesio, calcio o potasio), enfriando rápidamente el producto para evitar su cristalización o desvitrificación.

Vidrio celular: Material que se obtiene a partir de polvo vitrio y materia orgánica, por medio de sinterización en un horno. Existe otra modalidad que consiste en formar las «celdas de aire» en una nueva fusión.

Vidrio espumoso: Véase *Vidrio celular.*

Vinaza: Pósito que se produce en el fondo de los depósitos del vino, turbio y de consistencia casi pastosa.

Vinyloop®: Proceso de reciclaje mecánico en el que un disolvente selectivo disuelve la matriz de resina de PVC, liberando los aditivos de compuesto de PVC y los materiales secundarios. A continuación la resina de PVC y los aditivos se recuperan por precipitación, y ahí reside la originalidad del proceso, para obtener un compuesto regenerado.

Virología: Parte de la biología que estudia los virus (microorganismos mucho más pequeños que las bacterias).

Virus: Los microorganismos más pequeños capaces de producir enfermedades. No es propagable a medios inanimados y se multiplica sólo en células vivas, en las cuales de producen frecuentemente cambios citopatogénicos específicos.

Viruta: Pedazo de material en forma de lámina enrollada o de espiral que es extraído mediante un cepillo u otras herramientas, tales como brocas, al realizar trabajos de labrado sobre la madera o los metales. Se suele considerar como un residuo en industrias madereras o de forjado de metales. No obstante hoy en día tiene algunos usos.

Viscosímetro: Instrumento que se emplea para medir la viscosidad, generalmente de líquidos.

Vitaminas: Cada una de ciertas sustancias orgánicas que existen en los alimentos y que, en cantidades pequeñísimas, son necesarias para el perfecto equilibrio de las diferentes funciones vitales.

VITO: Instituto Flamenco para la Investigación Tecnológica. Su misión es el de entregar soluciones tecnológicas de innnovación científicamente comprobadas para promover el desarrollo sostenible y reforzar la estructura económica y social en Bélgica.

Vitrificación: Proceso que consiste en mezclar un residuo, preferiblemente industrial, con vidrio en polvo u otro material cerámico, y calentar la mezcla a más de 1.000 ℃ en un horno, con la finalidad de que, al enfriarse se convierta en un bloque vítreo sólido que aísle el residuo del medio. Proceso que se lleva a término a alta temperatura donde los integrantes, que se clasifican en formadores de vidrio, fundentes y anfóteros, van fundiendo y todos ellos pasan a formar parte de un silicato complejo amorfo cuyas propiedades no tienen nada que ver con las de los integrantes iniciales.

Vitrocerámico: Compuesto policristalino obtenido a partir de un vidrio fundido cuando se somete a varios ciclos de calentamiento y enfriamiento.

Vivero: Superficie de terreno dedicada a la cría de árboles jóvenes, principalmente para plantaciones en el campo.

Volátil: Que posee un punto de ebullición bajo, una temperatura de sublimación baja a presión ordinaria, o una presión de vapor alta a temperatura ordinaria.

Volteadora: Máquina utilizada para el volteo de las pilas de compostaje. Término empleado en la fabricación del compost para designar una máquina, generalmente automática, que va removiendo el compost para que se airee.

Voncogénico: Causante de tumores, sean benignos o malignos.

Vórtice: Centro de un remolino.

Vorticela: Microorganismos, protozoos, comunes en agua y suelos. Suelen estar en la superficie de un tallo.

Vulcanizar: Proceso consistente en combinar el azufre con el caucho para que este se torne flexible e impermeable.

Werzalit: Empresa alemana que construye distintos tipos de productos a partir del reciclaje de material de construcción. Uno de los ejemplos es el «plafón» que se compone de madera prensada con acabado superficial.

Whisker: Cristales filamentosos orientados en un solo eje, de metales (hierro, cobalto, aluminio, níquel, etc.), de materiales refractarios (alúmina, carburo de silicio, etc.), de carbono, de boro, etc. Presentan propiedades mecánicas, sobre todo de resistencia, muy notables.

Wollastonita: Mineral del grupo de los silicatos.Su fórmula genérica es: $CaSiO_3$ - $Ca_3[Si_3O_9]$. Las principales aplicaciones fueron (a final de la década de 1970) como sustituto de los asbestos de fibra corta. Actualmente ha adquirido un destacado papel como mineral con importantes características que le confieren el calificativo de «ecológico», ya que su utilización en la industria cerámica permite la incorporación del ion calcio a la pasta sin la introducción de carbonatos y, consiguientemente, sin desprendimientos de dioxido de carbono en las emisiones a la atmósfera. Asimismo reduce de forma muy importante los tiempos del ciclo de cocción, con los consiguientes ahorros energéticos y de emisiones gaseosas.

Xenobiótico: Sustancias artificiales que contaminan el medio ambiente (ciertos productos químicos, disolventes sintéticos, etc.). Sustancias químicas ajenas al organismo humano.

Xiloarcilla: Material confeccionado a base de un 3% a un 5% de residuos de polvos de lijado de barnices y madera. El componente mayoritario es la arcilla.

Xilol: Calidad comercial del xileno, mezcla de isómeros y otros derivados del benceno.

Xilosa: Azúcar de madera.

XPS: Abreviatura en lengua inglesa de espectroscopia fotoelectrónica de rayos X.

Yacijas: Residuo procedente de la cría intensiva del ganado aviar. Se compone de virutas o pajas mezcladas con las deyecciones de las aves.

Yermo: Paraje desértico, pobre en vegetación.

Yeso: Ver *anhidrita*.

Yute: Planta herbácea fibrosa, de la familia de las Malváceas, cultivada en regiones tropicales por sus fibras. Yute es también el nombre de las fibras textiles extraídas de esta planta y de otra similar, *Corchorus olitorius*.

Zahorra artificial: Material granular formado por áridos machacados, total o parcialmente, cuya granulometría es de tipo continuo.

Zeolita: Silicato que presenta la propiedad de intercambiar iones de sodio por cal u otros iones. A este tipo de zeolitas se les llama permutitas.

Zona afótica: La zona marina por debajo de los 1.500 m que es esencialmente oscura.

Zona anóxica: Ámbito donde no hay presencia de oxígeno.

Zona aulitoral: La parte superior de la zona litoral del fondo marino, que incluye la zona intermedia de mareas.

Zona costal: Tierras y aguas adyacentes a la costa que ejercen influencia en los usos del mar y su ecología, o por el contrario, las tierras que se ven afectadas por la influencia del mar.

Zona fótica: La zona marina en la que la penetración de luz es suficiente para la fotosíntesis, correspondiente a la zona limnética de los hábitats de agua dulce.

Zona sensible: Concepto introducido por el reglamento 797/85, para hacer referencia a las zonas exentas de la política agraria común. Estas son agricultura de montaña y zonas desfavorecidas, que serán objeto de medidas de protección.

Zona verde: Zona de una concentración urbana destinada a parques y jardines.

Zuro: Residuo procedente de desgranar la mazorca de maíz. Puede emplearse como combustible, o bien en alimentación animal.

ÍNDICE ANALÍTICO

Abbe, número de, 1002
Abono, obtención de, 157
Abrasión, resistencia a la, 512
Absorción, 99
  acústica, 278, 328
  física, 312
  química, 312
Acabados de superficies,
  industrias de, 371
  inertización de lodos, 371
Acción fotosintética, 421
Aceite(s),
  de cocina residuales, 731
  de orujo, 819
  esenciales, 578
    extracción de, 408
  industriales usados, 79
  minerales residuales, 1087
    ciclo de vida, 1090
    gestión de los, 1090
    regeneración por destilación, 1088
    regeneración total, 1089
    reprocesamiento, 1091
    valoración energética, 1089
  pirolíticos, 859, 860
  residuos de, 214
  ricos en ácidos grasos, 221
  sintéticos, emulsificación, 600
  usado,
    caracterización con respecto al gasóleo, 222
    de automoción, 214
    de los dumpers, 684
    logística de recogida, 219
    problemática ambiental, 218
    uso en los piensos, 219
    utilización como combustible, 222
    valorización, 222
  vegetales,
    bruto, 712
    esterificado, 712
    refinado, 712
    usados, 218
Acerías, polvos de, 469
Acero(s),
  afino del, 559
  comunes, 470
  de horno eléctrico, 558
  especiales, 470
  inoxidables, polvos de, 569
Ácido(s)
  grasos,
    libres, 221
    no saturados, 712
    volátiles, 187
  húmicos, 322
  ligero, 919
  poliláctico, 1028
Actividad(es),
  de valorización, 69
  extractiva, 657
Acumuladores de calor, 333, 341
  aislamiento térmico, 412
  aplicaciones,
    domésticas, 415
    industriales, 413
  residuos para la fabricación de, 411
ACV (análisis de ciclo de vida) 75
  aplicaciones al, 80
Aditivo(s),
  de gasolina, 313
  plásticos, 1003
Adsorción, 100
Aerosoles, manipulación de, 824
Afluentes,
  coloreados, 115
  con tensioactivos, degradación de, 116
  petrolizados, 116
    tratamiento, 116

Agenda 21, la, 82
  interacción y, 85
  local, 83
  relación empresa, 85
Agente(s),
  coalescente, 210
  nucleantes, 1002
AGP (almacenamiento geológico profundo),
  de residuos radioactivos, 1149
Agregados ligeros, 287
Agricultura y medio ambiente, 571
Agroquímicos, industria de,
  biocidas, 588
  fungicidas, 588
  herbicidas, 588
  insecticidas, 588
Agrovegetales, 308
Agua(s),
  absorción de, 350
  ácidas, 538
    de drenaje de minas, 672
  con pesticidas, 116
    sonoquímica, 117
  constituyentes solubles en, 866
  capilar, 935
  consumo de *per capita*, 12
  contaminación de, 12
  el ciclo del, 13
  de constitución, 918
  de escorrentía, 891
  de humedad, 949
  de las piscina, 761
  de lastre, 203
  de lavado cadena de enlatado, 352
  duras, 215
  industriales contaminantes, 994
  intracelular, 935
  libre, 935
  madres, 207
  potable, estaciones de tratamiento, 404
    valoración de lodos, 404
  residuales,
    depuración, 14, 15
    industriales, 13
    industrias cárnicas, 583
    reutilización de las, 17
    urbanas, 13
Aire secundario, 956
Aislamiento,
  acústico, 278, 328
  térmico, 270, 274
    y medio ambiente, 263
Aislantes,
  acústicos, 279
  de polvo de vidrio, 285
  fabricación de, 280
  térmicos, 279
Alcoholes, 587, 714
Algas, 737
  aplicaciones, 739
  clasificación de las, 738
  como abono, 739
  de aplicación energética, 741
  marinas, compostaje de, 728
  uso en la depuración, 740
Alimentación animal, 576
Alimento(s),
  animal, 587
  modificados genéticamente, 588
Almacenamiento,
  geológico del Co2, 419
  sumideros minerales, 422
  térmico, 417
    densidad de energía, 417
Alpechín(es), 214
  tratamiento, 215
Alquitrán ecológico, 138
Aluminio,
  escorias salinas, 367
  industria del, 364
  obtención del, 367
  reciclado, 570
  reciclaje del, 811
  recuperación de, 507
  valoración de residuos, 570
Amianto, 1102
  destrucción del, 369
  inhalación de fibras de, 1102
Análisis del ciclo de vida (ACV),
  en el tratamiento de RSU, 905
Anemia aplásica, 209
Ánodos, residuos de, 366
Anticongelantes líquidos, 823
Aparatos eléctricos y electrónicos, reciclaje, 1051
  composición de materiales, 1053
  valorización, 1053
Arcilla(s), 643
  aplicaciones de 347
  caoliníticas, 348
  con capacidad de intercambio iónico, 104
    resinas, 104
  minerales de, 119, 120, 346
  naturaleza de las, 345
Arena de fundición, 443
  en la vitrificación, 462
Árido(s),
  alcali,
    reacción, 399
    resistencia, 399
  artificiales, 292

en graveras, extracción de, 661
expandidos, 287, 348
estériles para la fabricación , 544
resistencia al fuego, 291
ligero,
aplicaciones construcción, 290
fabricación de, 289
para la construcción, 641
afección del nivel freático, 642
impactos producidos por la extracción, 642
naturales, 642
para proyectar, 686
reciclados, 386, 1104
hormigones de, 385
producción, 1106
sinterizado, 557
Armaduras,
corrosión de las, 363
de hormigón, corrosión por cloruros, 399
Aromatos alquílicos, oxidación de los, 627
Arquitectura,
bioclimática, 269
solar pasiva, 413
Arrastre,
con nitrógeno, 100
técnicas de,118
Arrecifes artificiales, 450
submarinos, 330
Arsénico, residuos en vitrificados, 446
Asbestos,
fibras de, 369
valoración de residuos en, 369
Aserrín impregnado con disolventes, 379
Asfaltenos, biodegradación de, 624
Asfaltos para firmes de carreteras, 632
Atmósferas reductoras, 448
Atomización, la, 967
Auditorías ambientales, 54
Automóviles,
carburantes, 1067
contaminación, 1064
evolución técnica y ambiental, 1063
reciclado, 1064
y residuos, 1064
y sostenibilidad, 1066
Azúcar, residuos de la industria del, 390
Azucareras, industrias, 585

Bacterias,
reductoras, 111
sulfatorreductoras, 886
Bagazo,
papel de, 587
tableros aglomerados de, 587
de caña, pulpas químicas de, 305
Bakyer, proceso químico, 364
Balance,
ambientales de la valorización de residuos, 70
de materia y energía, 775
energético, 748
Balastro para vías, 454
Balsas de lixiviados, 1108
Barnices,
residuos de fabricación, 627
valorización de polvos de lijado de, 373
Barras de electro/obtención, 682
Barreras,
absorbentes, 332
artificiales, 1108
reflectantes, 332
Barros arsenicales, 684
Basalto fundido, 469
Baterías,
de automoción, 1060
de tracción, 1061
estacionarias, 1061
Bauxita, la, 364
residuos de, 388
Bioaceites, cultivos para, 731
producción de, 713
Bioalcohol,
cultivos para la producción de, 713, 731
obtención de, 577
Bioconcentración del compuesto, 624
Biocarburantes, 314
conocimiento de los, 754
fabricación, 755
Biocatalizadores, regeneración de, 620
Biocidas, 588
Biocombustibles,
costos de producción, 733
gasificación, 718
generación de, 753
líquidos, 711
obtención de, 716
Biodegradabilidad, 882
resistencia, 949
tamaño de partícula, 951
Biodegradación *in situ*, 1127
Biodiesel,
mezclas con gasóleo de automoción, 227
problemas de arranque en frio con, 225
proceso de obtención, 223
producción, 224
transesterificación catalítica, 224
valoración económica del, 226
Bioflotación, proceso de, 148
Biogás, 885
acondicionamiento del, 886
aportación al efecto invernadero, 889

aprovechamiento energético, 608
de la producción, 724
composición del, 886
condiciones anóxicas, 887
evolución de producción de, 886
generado en el digestor, 872
lavado del, 874
producción de, 873
Biomasa,
a granel, 708
abatimiento de emisiones, 753
almidonada, 714
aplicaciones, 702
aprovechamiento, 730
del vapor, 723
energético, 711, 743
por combustión, 720
azucarada, 714
caracterización, 707
celular, 137
celulósica, 714
absoluta, 708
combustión en parrilla, 721
en lecho fluidizado, 722
como fuente de energía, 704
composición, 703
elemental, 752
conversión energética, obtención de hidrógeno, 768
costos, 730
de alto grado, 704
de origen homogéneo, 710
densidad de la, 708
densificada, 742
descripción del proceso anaerobio, 725
diagrama de combustión de una mezcla, 775
estimación de contaminantes, 753
gasificación de, 761
heterogénea, 710
instalación industrial valorización, 752
Nipon, programa, 808
pirolisis de la, 716
avanzada, 767
planta de incineración, 780
posibilidades de la pirolisis, 766
proceso de incineración, 721
producción en bosque mediterráneo, 759
superficie quemada, 760
propiedades, 708
recuperación de calor, 723
sistema de depuración,
de gases, 723
de escorias, 724
fisicoquímicas, 769
residual, 727
de origen forestal, 741
tipos de gasificación, 719
valorización energética, 710, 727
Bioercolación, la, 899
Bioplásticos, 1028
certificación de compostabilidad, 1031
como fracción de residuos, 1031
Biopolímeros, 1030
obtención de, 630
Biorreactores de membranas, 143
Biorrefinería, noción de, 709
Biotopo marino, 330
Biofenol A,
actividad hormonal, 797
capacidad para polimerizar, 797
Bivalvos, residuo de los, 860-861
Bloques,
de escoria, 409
de tierra-cemento-sisal, 315
rompeolas, fabricación con cenizas volantes, 403
Bolsa(s),
de residuos, 64
de Subproductos de Cataluña, 23, 45,
decantadoras, 652
Bomba calorimétrica, 708
Bombillas de Hg de descarga a alta presión, 1037
vapor de sodio de alta presión, 1037
Bonos de carbono, obtención de, 167
Borra contaminada, 691
Bosque como sumidero de Co2, el, 760
aspectos económicos, 760
Briquetas, fabricación de, 742
industrias.
cerámica, 63
del mueble, 62
textil, 62

Cables,
superconductores, 30
transformadores, 1035
Cadena trófica, persistencia en la, 869
Café,
descafeinado, 314
y té descafeinados, obtención, 408
Cal,
acción de la, 521
tratamiento, 900
de fangos con, 988
modificada, 131
Calefacción por suelo radiante, 416
Calentamiento por radiofrecuencias, 1124
Calidad de los fangos, 141
Calor de materiales, almacenamiento de, 413
Cámara,
de combustión, volumen de la, 780
de oxidación, 956

de postcombustión, 129, 956
torsional, 314
Cambio climático, 47, 759
Canales de desarenado, 942
Cáñamo, fibras de, 309
Capa de ozono, 1043
deterioro, 1044
protección de la, 630
Capacidad tampón, 185
Captación solar para usos térmicos, 271
Características edáficas, 187
Carbohidratos solubles, 711
Carbón,
activo, 100, 312
red microscapilar del, 361
contaminantes asociados al, 422
estériles de, 542
en las grandes obras publicas, 542
ladrillos de, 544
industria minera en España, 538
limpio, 538
regeneración del, 102
termiocas de, 552
tratamiento pirolítico del, 203
vegetal, fabricación de, 311
verde, el, 538
Carbonato cálcico, residuos de, 363
Carbonizado químico, 600
ciclo del, 700
en la litosfera, 421
nanotubos de, 32
obtención de bonos de, 167
Carga,
ambientales, 70
contaminante, 175
orgánica, 924
Cárnicas, industrias, 579
carne roja, 579
flotación por burbujas de aire, 580
subproductos, 580
cola de origen animal, 581
gelatina de tipo B, 581
harina, 581
hidratos de carbono, 580
piel, 580
plasma, 581
sangre, aprovechamiento, 581
tratamiento aguas residuales, 583
Cascotes,
de ladrillo, 386
de vidrio, 386
Catalizador(es),
agotados, 617, 1077
heterogéneo, 618
homogéneo, 618
Cationes, factor complejidad de, 437
Caucho,
industria del, 615
natural, 1081
sintético, 616
Cavitación,
acústica, 122
hidrodinámica, 122
CD regrabables, 102
Celda,
electrolítica, 367
ánodos de las, 366
de electrolisis, 621
Celulasa, producción, de, 305
Cementación, 344
proceso de, 692
en fase líquida, 692
Cementeras,
valorización en, 522
Cemento(s),
aluminosos, 368
belíticos, 375
blancos, 348
compuestos con puzolana, 393
de alinita, 858
de baja energía, 376
de escorias, 392, 564. 566
activada alcalinamente, 393
resistente al hielo, 392, 566
de fosfato, 360
de zeolita, 292
fabricación de, 251
fabricado con escoria, 380
fase amorfa, 343
hidratación del, 383
naturaleza de los, 374
problemas del cromo VI, 959
refractario, 344
siderúrgicos, 566
sulforresistente, 296
tiempo de fraguado, 375
valorización de residuos, 374, 382
vía de valorización de residuos, 373
Cenizas,
altas en cal, 396
de biomasa, vitrificación, 472
de fondo, 360
de incineración,
lavado de, 857
de fangos de EDAR, 363
de tratamiento térmico, 128
leñosas, 473
para cerámica, 524
prefabricados de hormigón, 521
volantes, 857

ácidos sinterizados, 557
bloques de arcilla estabilizada, 400
construcción de carreteras, 402
construcción de taludes, 556
de centrales termoeléctricas, 289, 344, 554
descomposición, 399
en hormigón, 397
en silíceas, 395
estabilizadores del suelo, 402
fabricación de bloques rompeolas, 403
hormigones celulares con, 383
ladrillos, 557
mezclas con cal y yeso, 400
propiedades hidráulicas, 397
reciclaje, 382
recuperación de metales, 556
resistencia al ciclo hielo/deshielo, 403
subbases de carreteras, 402
taludes construidos con, 556
tratamiento magnético, 557
uso de, 395
vertido, 857
vitrificación de, 462
volcánicas, 386
Centrales,
de ciclo combinado, 553
de fisión, 553
termoeléctricas, 423
termonucleares, residuos de, 482
cenizas volantes de, 554
valorización,
de fangos en, 959
de residuos, 554
vitrificación de cenizas volantes, 464
Cepas bacterianas modificadas, 1029
Cerámica (s), 29
aislantes, 342
cadena de esmaltado, 352
aguas de lavado, 352
determinación de la porosidad. 350
absorción de agua, 350
temperatura de cocción, 350
fabricación de, 251
porosas, 286
refractarias, 342
residuos de, 352
agua de lavado, 352
uso de residuos de cromo, 372
valorización, 523
de escorias, 688
de lodos de ETAP, 405
y vidrio, materia prima para, 403
Ceramización, 118, 344
mecanismo de la, 119
tecnología de la, 348
Certificación energética de edificios, 265
Cetano,
índice de, 222
número de, 713
Chatarra(s),
electrónica, 1035
nuevos recursos, 685
polvos de, 470
de recuperación, 471
de transformación, 471
radioactiva, 480
reciclada, 471, 559
recogida selectiva de, 559
Choque térmico, resistencia al, 294
Cianuro,
sales de, 367
oxidación de los, 206
Ciclo(s),
biogeoquímico, 746
combinado,
centrales de, 553
gasificación y el, 981
cortos de rotación, 746
de energía, cerrar el, 921, 992
de Rankine, 418, 854
de residuo cero, 992
de reuso, 1015
de vida, 74
análisis, 68, 78
categorías, 78
inventario del, 76
del carbono, 700
geoquímico, 746
vertido y, 82
Circuitos impresos, reciclaje, 1054
Clasificación de residuos, 72
Clínquer(es),
belíticos, 375
consecuencias ambientales, 380
empleo de residuos cocidos, 354
fabricación de, 343, 547, 648
incorporación de residuos al, 380
Clinquerización, reacciones de, 958
Cloración, la, 931
Clorofila, organismos fotosintéticos con, 738
Clorofluorocarbonos,
sustitución, 628
tratamiento, 628
Clorólisis, proceso de, 206
Cloruros, ataque de, 296
Co, emisión de, 499
eficacia de la combustión, 499
CO_2,
almacenamiento,
geológico del, 419

sumideros minerales, 422
fijación de, 423
gestión energética sostenible, 424
infiltración del, 422
secuestro químico/mineral, 419
sistemas orgánicos de captura, 423
sumideros, 419
valoración, 419
Cobre,
beneficios de, 689
escoria de, 379
extracción por disolvente, 691
vitrificación de polvos de fundición, 478
Codificación de residuos, 181
Codigestión, 874
anaerobia, 138
de fangos de depuradora, 138
de forma, 385
Coincineración, 860
con fangos, 957
Colas,
con base en almidón, 600
de origen animal, 581
sintéticas, 582
Colágeno, estabilización del, 194
Colorantes,
disolventes para, 822
sintéticos, 582
Combustible(s),
fósiles, impacto ambiental, 548
fuentes de energía, 548
plantas de fabricación de, 853
producción derivado de RSU, 870
sobre el medio natural, 548
Combustión,
completa, 774
de RSU, proceso de, 849
en leche fluidizado, 722
en parrilla, 721
perfecta, 774
Compactadores de latas, 1024
Composición de los purines, 184
Composites, 28
Compost,
clases de, 160
de mala calidad, riesgos, 872
fabricación de, 152
gris, 792
higienización del, 155
producción de, 577
y vertederos, 871
Compostabilidad, certificación de, 1031
Compostaje, 150, 728, 867, 916
aplicación a los fangos, 157
fases del proceso de, 153
materiales obtenidos, 157
plantas de, 608
residuos utilizados, 729
sistema abierto de, 728
sistemas cerrados, 728
vermicompostaje, técnicas de, 624
Compra verde, la, 253
Compuestos,
amoniacales, 608
aromáticos en disolución, 115
clorofluorocarbonados, 209
intermedios de la combustión, 956
lignocelulósicos, 703
orgánicos,
persistentes, 623
tóxicos, 623
volátiles, 146, 208
secuestradores, 216
tóxicos,
en productos comerciales, 820
problemática, 795
retardantes de llama, 796
Concentración,
de remolacha, 314
del contaminante. 240
por via química, 213
Condiciones edáficas, 741
Conductividad,
hidráulica, 1114
térmica, 272
de algunos residuos, 274
Conservación,
de la naturaleza, 45
y remojo de las pieles, 201
Conservas vegetales, 575
Constante de Henry, 1123
Construcción,
materiales ecológicos para, 335
rocas industriales para, 640
Contabilidad ambiental, 56
Contaminación,
ambiental, residuos peligrosos urbanos, 823
control integrado de la, 257
de aguas, 12
difusa, 185
en origen, 50
reducción de la, 52
exógena, 1119
por fitosanitarios, 571
procesos energéticos, 930
Contaminantes,
atmosféricos, 7
del suelo, 1120
factores de riesgo, 175
límites impuestos, 28

órganicos,
movilidad, 180
persistentes (COPs), 229
Contenedores, vaciado de los, 792
Conversiones energéticas, eficacia de las, 928
Conversión, proceso de, 694
Corazón negro, 544
Corcho por fluidos supercríticos, tratamiento del, 408
Corrección de emisiones de COV, 210
Corrientes,
de Eddy, 1072
de Foucault, 217, 1049
Corrosión, 177
de las armaduras, 363
por cloururos en hormigón, 399
Coste(s),
ambientales, 56
de vertidos, evolución del, 896
impuestos verdes, 896
Costras, formación de, 133
Craqueo térmico, 777
Crédito(s),
de reforestación, 36
de carbono, 423
Creosota de alquitrán, 588
Criterios de ecoeficiencia, 52
Cromo,
cerámica, uso de residuos de, 372
hexavalente, 372, 522
en cementos, 376
recuperación del, 195
trivalente, 959
CSFK (Condensed Silica Fume), 394
Cualidad bioclimática y sostenibilidad, 266
Cubiertas de fibrocemento, rehabilitación de, 920
Cuero, 591
residuos de la industria, 594
emisiones atmosféricas, 595
líquidos, 594
sólidos, 595
técnicas. 595
Cultivo(s),
de microalgas, 874
energéticos, 430, 743, 747
forrajeros, 571
Curtición,
al vegetal, 201
fluidos supercríticos en el desengrase, 202
orgánica, 202
Curtido de piel, 590
acabado, 593
mineral, 592
vegetal. 592
tintura, 593
Curva de destrucción térmica, 847
Darcy, ley de, 1113
Deacon, equilibrio de, 497
Degradabilidad, medida de la, 866
Degradación,
de efluentes con tensioactivos, 116
termooxidativa, 221
Demanda,
biológica de oxígeno, 175
energética en la UE,
evolución, 1144
proyección de la oferta, 1146
residuos radiactivos, 1147
química de oxígeno, 175
Deming, rueda de, 53
Demolición en la construcción,
aspectos peligrosos, 1102
amianto, 1102, 1103,
material asbestiforme, 1102
Densidad y comportamiento térmico, 272
Depósito(s),
arsenicales, 669
de aguas residuales, 14
potencial de carbono, 151
subterráneos, 1112
Depuradoras industriales, 935
Desalación, problemática ambiental, 17
Desamiantado, 450
Desarrollo sostenible, 81, 83, 630
Descomposición,
aerobia heteótrofa, 186
anaerobia, 917
de los minerales no arcillosos, 116
Desechos catódicos, 367
Desencalado y rendido de la piel, 201
Desengrasante de metales, 822
Desguace selectivo, 1074
Deshalogenación, 1126
Deshidratación mecánica, 962
centrífugas, 963
elutriación, 966
filtros,
banda,
de vacio, 966
prensa, 965
sistemas de, 963
Desinfección.
con vapor, 239
por microondas, 239
química, 98, 239
Deslignificación mecánica, 305
Desnitrificación, 939
Desorción térmica, 100
Despolimerización del PET, 1007
Destilación, 105
al vacio, 106

fraccionada, 106
molecular, 106
Destoxificación solar, 116
Destrucción fotocatalítica, 99
Desulfuración, instalaciones de, 330
Desvitrificación, 436
controlada de vidrios, 510
Detergentes, formulación de, 215
Detoxificación, tratamientos fisicoquímicos, 212
Deyecciones ganaderas, 183
Diagrama,
de combustión, 771
de Sherwood, 240
Digestores, tratamiento térmico en, 230
Dioxinas,
formación natural de, 847
y furanos, reformación de, 958
Directivas,
relativa a vertido en vertederos, 892
1999/31/CE, incidencia de la, 993
Directrices de la UE gestión de fangos de depuradoras, 913
Disolvente(s), 217
a temperatura crítica, 146
extracción por, 146, 691
organoclorados, 145
usados, 144
Disruptores endocrinos, 1003
Distric heating, 271
DME, 714
Dulong, fórmula modificada, 771
Dumpers, utilización de aceite usado, 684

Ecoauditoría en la UE, sistema de, 256
Ecoeficiencia, criterios de, 52
Ecogestión en la UE, sistema de, 256
Ecogyps, 331
Ecología industrial, 40
Ecoparcs, 253
selección óptica de bolsas, 837
Ecoproducción, 50
Ecopuntos, método de los, 80
Edificación,
consumo energético en la, 269
energéticamente sostenible, 265
Edificios, certificación energética, de, 265
Educación ambiental, 97, 788
Efluentes,
galvánicos, 148
líquidos, 195
Electricidad, generación de,
aspectos ambientales, 551
rentabilidad de suministro, 551
sector de la, 549
sostenibilidad de la, 549
Electrodomésticos, reciclaje de, 1035
Electrolisis, 691
Electrones, potencial de, 700
Electroobtención, 691
Embalajes, ley de, 63
Emisiones atmosféricas, 6
de compuestos aromáticos, 226
de COV, corrección de, 210
de metano en vertederos, 887
en la gasificación, 983
fugitivas, 51
valores límite de las, 849
Encapsulación, 118
técnicas de, 127
Encefalopatía espongiforme bovina, 231
Energía(s),
ahorro en el reciclaje, 68
de activación, 850
de residuos agroalimentarios, 314
densidad de, 417
medidas de ahorro, 270
primaria, 39
renovables,
aspectos ambientales, 554
seguridad de suministro, 550
repercusiones ambientales del uso de la, 548
solar,
almacenamiento de, 418
térmica, 270, 549
Enlaces,
covalentes, 333, 341
iónicos, 333, 341
metálicos, 333, 341
Enlatado de frutas, 578
Enmienda orgánica, 185, 322, 1129
obtención, 157
Entropía, aumento de la, 70
Envase(s),
de fitosanitarios, 236
de un solo uso, 1014
gestión de, 63
Ley de, 63
ligeros, recogidas de, 802
primario, 800
residuos de, 63
secundario, 800
selección de, 1015
Enzimas,
del rendido, 195
hidrolíticas, 725
EPER (Registro Inventario Europeo de Emisiones Contaminantes), 9
Epidemia de encefalopatía espongiforme bovina, 231
Equilibrio de Deacon, 497
Equipos,
con pantalla reciclaje, 1051

refrigerantes, reciclaje y gestión, 1050
y maquinaria de oficinas, impacto ambiental, 1054
Erupciones volcánicas, 209
Escombros de carreteras y construcción,
reciclado de, 632
valorización, 631
betunes alquitranados, 631
de firmes, 631
Escoria(s),
agotamiento de, 778
blancas, 560, 562
cemento de, 392, 564
conductividad eléctrica de las, 568
de alto horno, 392
granulada, 565
de aceros comunes, 569
de base salina, 211
de ferroaleaciones, 393
de hornos eléctricos, reciclado por fusión, 568
de incineración, 613, 856
empleo y naturaleza, de, 562
en capa de rodadura, 562
estabilización de las, 614
fabricación de cemento, 688
fritadas, 392
fundida, 687
granular Waelz, 1142
hormigones de, 565
ligeros de, 287
IGCC, 515
LD, 562
metalúrgicas, 358
mortero de, 393
negras, 560, 562
en cementera, 564
porosa, 287
recuperación de calor, 686
riesgo,
de expansión, 563
de hinchamiento, 563
salinas de aluminio, 367
siderúrgicas, 468, 469
vitrificación, 467
uso como sustituto de grava, 567
valorización de, 292, 359, 686
Espacios degradados, restauración, 912
Especies,
arbustivas perennes, 749
forestales de rápido crecimiento, 732, 750
Espumas de poliuretano, 1050
Esquistos bituminosos, 351
Estabilidad,
oxidativa, 709
tectónica, 1152
Estabilización, 126
Estaciones depuradoras de aguas, 609
Estado ambiental en España, 38
Esterificación, proceso de, 713
Estériles,
de carbón,
composición, 540
generación y empleo de, 542
poder calorífico de los, 540
de escombrera, 539
de lavadero, 539
de mina, 539
en la minería, 539
en los labores de explotación, residuos generados, 647
en el frente de arranque, 648
en la zona de instalaciones, 649
gestión de los, 651
negros, 539
para fabricación áridos expandidos, 544
rojos, 539
terrazas con, 663
Estiércoles, 735
Estratigrafía de impermeabilización, 1109
Estructuras metálicas, seguridad contra incendios, 401
Etanol,
costos de producción de, 734
recuperación de, 625
Etiqueta ecológica, 256
Etiquetado ecológico, 253
Eutécticos, formación de, 136
Eutrofización, 939
de origen atmosférico, 941
fuentes de, 940
medidas, 941
Evaluación,
etapas de una, 57
de impacto, 80
Evaporación,
al vacio, 106
con bomba de calor, 107
multiefecto, 107
por termocompresión, 107
Explotaciones mineras, revegetación de las, 539
cubierta vegetal, 539

Fabricación de todo uno, 1105
Factor complejidad de cationes, 134
Fango(s),
aceitosos, 617
ácidos, 617
activados, 936
calidad de, 141
proceso de, 141, 917
ceramización de, 282
composición másica de, 914
de blanqueo,

con hipoclorito, 193
sin cloro, 193
de depuradora,
aplicación a la agricultrua, 911
codigestión de, 138
costes de vertido, 993
fases de aireación, 911
gestión de, modelo acorde con las directrices de la UE, 912, 913
incineración, 984
diversas opciones, 985
tratamiento y valorización, 911
de Edar,
aplicación en tierras de cultivo, 317
cerámica, 319
consideraciones energéticas, 320
gestión de, 318
incineración, 317
potencial energético, 319
transporte y depósito en vertederos, 316
tratamiento terciario, 317
acondicionamiento químico de, 963
actividad biológica, 936
análisis de, 945
aplicación al suelo, 16
aplicación en tierras de cultivo, 317
caracterización, 935, 946
cerámica, 319
como combustible, 947
consideraciones energéticas, 320
contaminación, 937
materia oxidable, 937
sólidos disueltos, 937
sólidos en suspensión, 937
destino de los, 932
estructura energética, 948
grasas totales, 949
evolución de la gestión en la UE, 934
gasificación de los, 926
gestión de, 318
gestión energética, 921
incineración de, 927
incineración, 317
metanización, 924
minerales presentes en los, 918
pirolisis de, 925
por gasificación, valorización, 982
potencial contaminante, 916
potencial energético, 319
propiedades biológicas, 950
residuos fermentables,950
secado, 960
cámara de, 961
directo, 961
indirecto, 961
y deshidratación, 961
tipos de, 944
transporte y depósito en vertederos, 316
tratamiento terciario, 317
tratamiento, 16
problemática, 952
comportamiento reológico, 954
fluido tixotrópico, 954
valorización,
en centrales termoeléctricas, 959
en hornos de clinquer, 957
vertido, 923
vitrificación de. 473
caracterización de las cenizas, 474
residuos secundarios, 474
valorización, 475
industriales, valorización, 316
primarios, 943
secundarios, 943
Farmacéutica, industria, 619
Fase (s),
anóxicas, 943
amorfa, 343
de pelambre, 193
Fauna, desplazamiento de la, 655
Fenómeno de la coalescencia, 209
Fenton, método,
aplicaciones industriales, 115
proceso de, 113
tecnología, 112
Fermentación entérica, 11
Ferroaleaciones,
escorias de, 393
fundiciones de, 394
Ferosilicio, aleaciones de, 394
Fibra(s), 597-598
de amianto, 448
de asbesto, 369
de basalto, 448
de cáñamo, 309
de fique, 309
de refuerzo, 342
hueca, módulos de, 143
minerales, 447
polímeros reforzados con, 309
Fibrocemento, cubiertas de, 920
Fijación química de los contaminantes, 126
Film retráctil, 1006
Filtros biológicos, 140
Firmes de carretera, demolición de hormigón para, 633
Fischer-Tropch, síntesis, 1067
Fisión, centrales de, 553
Fitorremediación, tecnologías, por, 1128
Fitosanitarios,
contaminación por, 571

envases de, 236
productos, 626
Fitoextracción inducida, 1128
Flora,
eliminación de la, 655
bacteriana, desarrollo de la, 936
Flotación por burbujas de aire, 580
Fluff, valorización energética, 1078
Fluido(s)
de corte, 213
de mecanizado, 213
espumantes, 1045
frigoríficos, descontaminación de los, 629
supercríticos, tecnología de, 408
Formación de,
briquetas, 192
costras, 133
eutécticos, 136
Formadores de vidrio, 343
Fórmula de Dulong modificada, 771
Formulación de detergentes, 215
Fosfatos,
cementos de, 360
eliminación de, 109
Fotocatalisis, 116
Fotosíntesis artificial para general hidrógeno, 425
Foucault, corrientes de, 217
Fracción,
fina del todo-uno, 650
inorgánica, caracterización, 945
orgánica,
caracterización, 945
valorización, 915
resto, 1015
Frutas, proceso de enlatado, 578
Ftalatos, 1009
Fuego, placas aislantes contra el, 401
Fuerzas de Van der Waals, 101
Fulerenos, 453
Fundentes fluorados, 461
Fungicidas, 588
Fusibilidad de los materiales para vidrio, 432
Fusión en horno,
de electrodos sumergidos, 457
de arco, 457
eléctrico, 457

Gafas usadas, 791
Gallinaza, 735
Gas(es),
almacenamiento en depósitos, 423
calor sensible de los, 413
con membranas, separación de, 889
de síntesis,
posibilidades, 765
valorización del, 980
de vertedero, 750, 925
para obtener hidrógeno, 885
valorización del, 167
límites de emisión y depuración de, 498
natural, purificación del, 203
plasmógeno, 507
poder calorífico, 863
presencia en los vidrios, 445
refrigerantes, reciclaje de equipos con, 1044
sulfurados, 851
tiempo de residencia de los, 136
tratamiento de los, 848
Gasificación, 351, 861
de biomasa, 761
de palets de RSU, 862
emisiones atmosféricas. 983
en condiciones,
severas, 979
suaves, 979
y ciclo combinado, 981
Gasolinas, aditivo de, 313
Gelatina, 581
Generación,
de porosidad, 119
de residuos *per capita*, 74
Geomembrana sintética, 890
Geosintéticos, aplicación a obras públicas, 1109
Gérmenes,
cristalinos, 510
patógenos, 950
Gestión ambiental,
de los sistemas de producción, 50
de envases, 63
de fangos en la UE, 934
de los RSU, 39
de residuos,
de envases, 63
métodos *end of pipe*, 48
prioridades, 81
quinto programa de acción, 47
radiactivos de alta actividad, 487
sistema de, 52
GICC, tecnología, 980, 982
Glasfalto, 355
Granza reciclada, 1008
Grava, uso de escorias, 567
Graveras de montaña, 661
Gres porcelánico, pulido del, 353
Gtécnicas físicas, 99
Guanos, los, 737

Halógenos,
vitrificación y los, 461
y metales pesados, 991

Harinas,
cárnicas, 231
de algas, 740
Hebras de DNA, 205
Henry, constantes de, 1123
Henry-Dalton, ley de, 898
Herbicidas, 588
Hidratos de carbono, 580
Hidrocarburos,
condensables, 929
en fondos océanos, 421
residuos contaminados, con, 625
Hidrofluorocarburos, tratamientos, 630
Hidrógeno,
densidad energética, 768
generación por fotosíntesis, 425
obtención de, 768
producción biológica del, 768
Hidrólisis química térmica, 110
a alta presión, 235
compuestos orgánicos insaturados, 111
enzimática, 200
térmica, 988
Hidrolizados de proteína, 582
Hidrometalurgia,
borra contaminada, 691
extracción por disolvente, 691
lixiviación,
en bateas, 690
en pilas, 690
por agitación, 690
técnicas de, 690
Hidroxilación, 113
Hidruro metálico de níquel,
Hormigoneras, residuos de las, 382
Hormigones,
aligerados, 374
celular, 383
celulares con cenizas, 383
cenizas para prefabricados de, 521
con microsilice, 295
de alta resistencia, 297
de áridos reciclados, 385
de escorias, 565
de fango de depuradora, 383
demolición para firmes de carretera, 633
fisuración de origen térmica, 398
ligeros, 384
de escorias, 287
permeabilidad del, 296
porosos, 563
proyectados, 297, 401
Horno(s),
de bandeja, 986
de capa fría, 456
de clínquer,
inercia gtérmica, 377
tiempo de residencia de gases, 377
valorización de los fangos, 957
de fusión abiertos convencionales, 455
de lecho fluidizado, 851, 985
de parrilla, 851
dimensionado, 779
de recocido, 510
de vitrificar residuos, 990
eléctrico, fusión en, 457
atmósfera interior, 457
tipos de, 458
multibandejas, 957
para RSU, tipos de, 850
rotatorio, 778, 852
Waelz, 1143
Huella ecológica, 33
Huesos,
porcelana de, 360
tratamiento de residuos de, 359
Humus,
formación de, 573
del suelo, nivel de, 157

Imanes overband, 1015
Impacto ambiental,
actividades mineras típicas, 670
declaración de, 255
estudio de, 255
evaluación de, 255
materiales y productos construcción, 645
declaraciones ambientales, 646
intensidad energética, 646
minería metálica, 664
por explotaciones mineras, 667
vertederos, 882, 1114
Impacto de residuos, reducción de, 253
Impermeabilización,
de taludes, 1110
tratamiento de, 797
Impuestos verdes, 896
Impurezas, esponificación de las, 600
Incendios forestales, 758
Incineración,
costes de RSU, 904
de fangos, 955
de depuradora, 984
de residuos tóxicos, 49
de RSU, 848
aspectos ambientales, 847
aspectos sociales de la, 858
temperatura, 847
tiempo de residencia, 847
y de fangos, 360

lavado de cenizas, 857
rendimiento energético, 853
sistemas avanzados de, 854
valorización,
de las escorias, 856
mediante, 984
vertido de cenizas volantes de RSU, 857
Incinerador, parámetros de cálculo, 777
Incineradoras,
de RSU, vitrificación de cenizas volantes, 463
emisiones gaseosas de, 858
Incrustación de animales, 208
Índice,
de actividades planta de fabricación, 59
de Los Ángeles, 1104
de sitio, 747
Industria,
azucarera, 585
caña, azúcar de, 586
remolacha, 586
de la piel, 588
del caucho, 615
farmacéutica, 619
oleícola, 585
orujo de dos fases, 585
petroquímica, 615
química, 614
textil, 596
vinícola, 584
fermentación del mosto, 584
Inercia térmica, 266
Infiltración,
del CO2, 422
punto de, 93
Inmisión, 6
Inoculación del fango, 924
Insecticidas, 588
Insectos, destrucción de, 588
Instalaciones de desulfuración, 330
intercambio iónico, 103
Inundaciones, riesgo de, 543
Inventario del ciclo de vía, 76
Inversión térmica en una mina, 667
Ion de litio, 1041
Irradiación selectiva, 479
Isótopos,
hijos, 483
radiactivos, 480
en los cascotes, 355

Jabones, los, 215
Jumbra de penuria, 12

Kraft, proceso, 299
Kyoto, proceso, 299

Lacas, residuos de fabricación, 627
Ladrillo(s),
aislantes, 282
cascotes de, 386
cenizas volantes, 557
de cal con adición de escoria, 410
de escoria, 408
de silicato cálcico, 410
fabricación de,918
con fangos, 918
Lajas, índice de, 386
Lámpara(s),
de alumbrado, características, 1038
de halogenuros metálicos, 1037
de mercurio según USEPA, manejo, 1040
descarga de gas,
a alta presión, 1039
a baja presión, 1038
Lana celulosita, 628
Lastrado y deslastrado, 204
Lavado del suelo, 1122
Lechada de cal, adición de, 361
Lecho,
de zeolita, 291
filtrantes, 943
fluidizado, 722
secantes, 977
Leñosas de rápido crecimiento, cultivos de, 732
Lexiviación y carga contaminantes, 176
Ley,
de Darcy, 1113
de envases,
y embalajes, 63
y residuos de envases, 799, 800
de Henry-Dalton, 898
de minas, 639
de residuos urbanos, 798
Liberación,
hídrica, 325
rápida de nitrógeno, 159
Libro blanco,
de las energías renovables, 553
del envase y embalajes, 248
Licopeno, poder antioxidante, 578
Licor de cromo refinado, 198
Lignito, térmicas de, 552
efectos carcinogénicos, 552
Lignocelulosa, fraccionamiento de la, 714
Límites,
de contaminantes, 28
del reciclaje, 27
Líquido(s),
inmiscibles, separación de, 104
pliroleñoso, 717
subenfriado, 431

Lixiviación,
de productos vitrificados, 458
en bateas, 690
en pilas, 690
evaluación del test de, 180
por agitación, 690
resistencia a la, 179
test de,178
estándar de, 72
Lixiviados, 883
acción bacteriológica sobre los, 149
composición de, 884
evolución de los componentes, 884
reacción bacteriológica, 149
recogida de, 883
Llama,
resistencia a la, 275
retardantes de, 31
temperatura de, 776
Lodo(s),
cerámicos, 354
ceramización de, 282
de anodizado, valorización de, 372
de destintado, 302
de estaciones de tratamiento de agua potable, 404
de ETAP, 406
de graveras, valorización, 406
valorización cerámica, 405
de reactores, 619
en la vitrificación, 525
galvánico, 476
industriales, 994
rojos, 3
generación, 570
valorización cerámica, 365
semidentados, problemática ambiental, 519
métodos de tratamiento, 520
Logista de recogida de aceites usados, 219
Lombrices, cultivo de las, 871

Madera,
conservadores de, 588
impregnada, 307
residuos de los tratamientos, 192
y ciclo de vida, 307
Masa(s),
asfálticas,
en caliente, 251
incorporación a, 250
densimétricas, 870, 1049
forestal, 758
gresificables, 351
Mataderos, fangos de los, 917
Materia y energía, balance de, 775
Materiales,
aislantes,
artificiales inorgánicos, 276
artificiales orgánicos, 277
clasificación de. 276
naturales, 276
propiedades, 275
bituminosos procedentes de demolición, 245
cerámicos,
microestructura del, 282
propiedades, 283
resistencia a los agentes químicos, 284
retención de metales pesados, 284
sostenibilidad, 336
de baja refractariedad, 371
de fibra y madera residual, 305
especificados de riesgo, 583
filtrante, 617
plásticos, 626
procesado, 1024
poliméricos, 999
radiactivos, vitrificación, 479
irradiación selectiva, 479
medicina nuclear, 479
refractarios conformados, 413
Materias grasas, 62
MBR, sistema, 143
Medicamentos usados, 790
Medicina nuclear, 479
Medida de progreso alcanzado, 58
Medio ambiente, Programa de las Naciones Unidas, 50
edáfico, 249, 573
Mejillón cebra, 204
Mejores tecnologías disponibles, 48
Membranas,
separación con, 148
sumergidas, 143
Mercurio,
en vertederos, 606
recuperación del, 1059
Metales,
acero estañado, 811
acero galvanizado, 811
altamente volátiles, 382
calamina chatarra, 812
catalizadores, recuperación de, 508
contenido en efluentes, 1073
desengrasante de, 822
en residuos secundarios, 129
envases,
de acero, recuperación, 811
de aluminio, 811
mesados en fangos, 938
métodos de tratamiento de, 1074
microorganismos adecuados para el tratamiento, 149
nomenclator relativo a recuperación de, 811

presentes en agua residual, 938
reactivos, 507
refractarios, 382
recuperación de, 507
recogida selectiva, 812
secundarios, 818
volátiles, 382
y aleaciones, 29
Metalurgia extractiva, 676
Metalúrgicas, valorización de residuos, 407
matriz cerámica, 407
Metanización, 872
de fangos de EDAR, 924
de los RSU, 161
de residuos mezclados, 165
húmeda, 164
húmeda, 924
Metano,
digestores, 917
Fenton, aplicaciones industriales, 115
plantas que emiten, 424
producción de, 577
Métodos hidrometalúrgicos, 1141
Mezclas,
asfálticas, 1085
bituminosas, encapsulación, 522
explosivas en vertederos, 881
Microalgas,
cultivos de, 874
red de, 425
Microorganismos,
patógenos, 919
termofilicos, 153
Microsilice, 292
hormigón con, 295
Mieles, 587
Minas, inversión térmica en una, 667
Minerales,
beneficio de, 674
de arcilla, 119, 120, 347
puzonalidad de los, 389
de baja ley, 680
energéticos, 536
explotación y procesamiento, 676
métodos subterráneos de, 676
por desmonte de capas, 676
yacimientos horizontales, 676
no metálicos, 537
estabilidad geológica, 537
procesos de beneficios, 689
residuos generados, 680
de concentración, 681
de flotación, 680
de lixiviación, 681
en el proceso de extracción, 680
Minería,
a cielo abierto, 535
actividad extractiva, 657
proyecto de restauración, 657
afecciones ambientales, 652
acciones contra el polvo, 654
como evitar o eliminar acciones contra el/la, 654
destrucción del suelo edáfico, 655
eliminación de la flora, 655
impacto visual, 656
pérdida de la morfología, 655
polvo, 652
ruido, 655
vibraciones, 655
impacto visual, 652
pantallas arbóreas, 654
del carbón, plan de, 536
explotaciones al aire libre, 640
energética, 639
generación de estériles en la, 539
impacto ambiental por explotaciones, 667
metálica, 536, 639
característica, 666
impacto ambiental, 664
pasivos ambientales, 536
problemática, 666
para materiales de construcción, 639
problemas de la erosión, 539
incidencia de la agricultura, 539
residuos industriales, 682
masivos, 683
peligros, 683
subterránea, 535
Minimización de residuos, 48
Mix eléctrico, 538
Mobiliario urbano, 355
Modificadores,
de red, 991
del retículo, 343
Módulos de fibra hueca, 143
Moho y hongos, formación de, 600
Moléculas bipolares, 97
Momificación, proceso de, 883
Monóxido de carbono, 499
Morfología, pérdida de la, 655
Morteros de escorias activadas, 393
Mosaico de vidrio, 356
Mosto,
de la uva, 199
fermentación del, 584
Motores,
de combustión interna, eficiencia de, 425
flex, 714
Movilidad,
contaminantes orgánicos, 180

de los residuos, 175
Muebles frigoríficos, sistemas de trituración, 1048
Mulch, composición del, 539
Muro Trombe, 411

Naftas ligeras, 203
Nanomateriales, 31
Nanotubos de carbono, 32
Naturaleza,
coloidal, 102
conservación de la, 45
Negro de humo, 1081
Neumáticos,
composición y características, 1080
fuera de uso, valoración, 1080
reciclaje de, 1081
usados, valorización del granulado, 1084
Neutrones, 483
Nitrificación, 939
desnitrificación, 190
Nitrógeno,
amoniacal, 185
eliminación de, 189
liberación rápida de, 159
Noción de cavitación, 122
Normas ISO 14000, 52
NOx, emisiones de, 493
Nutrientes,
eliminación biológica de, 189
recuperación de, 188

Oleaginosas, cultivos de, 734
OMG (Organismos modificados genéticamente), 34
Ondas,
cónicas de alta frecuencia, 122
ultrasónicas, 117, 122
Organismos,
fotosintéticos, 700
con clorofila, 738
heterótrofos, 137
modificados genéticamente (OMG), 34
parasitarios, 950
Organoclorados, emisiones de, 381
Ostwald, diagrama de, 773
Overband magnético, 1049
Oxicombustión, 492
Oxidación,
catalítica, 113
de los cianuros, 206
húmeda, 111
con peróxido, 112
química, 110
Oxidantes fotoquímicos, 208
Óxido(s),
co-formadores de retículo, 345
de vidrios, 436
del retículo, 435
estabilizadores de red, 435
formadores de vidrio, 345, 434
fundentes, 345
Oxígeno, demanda,
biológica de, 175
química de, 175

Palets, 742
Palomina, 735
Panales,
desechables, 230
reciclado, 230
fotovoltaicos, 270
Pantallas,
acústicas, 332
materiales para fabricación, 333
neumáticos usados en, 333
arbóreas, 654
de cristal líquido, 1043
Papel(es),
a partir de bagazo, 587
blanqueo del, 300
con brea o alquitrán, 299
de pergamino, 299
fabricación, 300
generación de residuos de, 816
reciclado, aislantes de, 303
recuperado, 303
resistencia en húmedo, 299
tratados con caucho, 299
usado, valorización del, 297
calidad de la pulpa, 298
pastas químicas al sulfato, 298
proceso Kraft, 299
y cartón, 809
tasas de utilización, reciclaje y recogida, 809
obtención en subproductos vegetales, 587
residuos de la transformación, 193
Paredes compuestas, 280
Parrilla, carga térmica de la, 779
Partículas,
alfa, 483
beta, 483
sólidas sedimentables, 495
Pasta, fabricación de, 304
Pasteurización, 139
de la materia orgánica fermentable, 875
sistema de, 876
PAVAL, aplicaciones del, 368
Pavimentos, residuos peligrosos, 354
Pb, recuperación de, 569
PCB's, toxicidad de los, 623
Pelambre, fase de, 193

Peletización, la, 897
de RSU, 897
extrusora, 897
Película de pintura, formación de, 209
Penuria, umbral de, 12
Percolación, proceso de, 895
Perlita expandida, 251
Pesticidas de cereales, extracción, 408
PET, despolimerización del, 1007
Petróleo, térmicas de, 553
Petroquímica, industria, 615
valorización de residuos, 617
Piel(es), 591
conservación y remojo de las, 201
desencalado y rendido de la, 201
industria de la,
impacto ambiental, 588
proceso de curtido, 590
polvo de piel curtida, 199
precipitación, 198
recirculación directa del baño residual, 197
recortes de tripa, 199
redisolución, 198
residuos en la curtición, 193
estabilización del colágeno, 194
operaciones de piquel, 194
operaciones de rivera, 194
retales salados, 199
Pilas,
botón, 1059
de combustible, 425, 1069
de metanol, 1069
de volteo, compostaje, 728
estáticas, compostaje, 728
salinas y alcalinas,
proceso hidrometalúrgico de reciclaje, 1059
y baterías de potencia, reciclaje, 1055
clasificación, 1055
Pinturas,
base,
aceite, 823
agua, 210
de automóviles,
cadenas de, 627
lodos de, 208
de látex, reciclaje de, 823
emisiones de COV, 209
en polvo, 62
libres de emisión, 210
Piquel, operaciones de, 194
Pirolisis, 860
convencional, 878
de fangos, 925, 988
de la biomassa, 716
posibilidades, 766
flash, 925
fraccionada, 529
residuo carbonoso de la, 716
y obtención de combustibles líquidos, 1026
Pirometalurgia,
beneficio por, 693
fundición de eje o matas, 693
tostación, 693
productos de, 693
Pirorrefinación, 694
Pirorretardantes,
bromados, 1043
halogenados, 822
Pizarras, estériles de, 351
Plaguicidas, tráfico ilegal de, 230
Plan de minería de carbón, 536
Plan nacional,
de lodos, 933
de minería, 639
de residuos urbanos (España), 814
Plano global, el, 83
Planta(s),
cementeras, valorización de fangos en, 913
de incineración de biomasa,
viabilidad económica, 780
de purines, 611
de tratamiento de residuos,
de compostaje, 608
de purines, 611
estaciones depuradoras de aguas, 609
impacto ambiental, vertederos, 605
incineradoras de RSU, 612
de tratamiento fisicoquímico, 127
leñosas de rápido crecimiento, 424
que emiten metano, 424
Plantaciones con fines energéticos, 746
Plasma,
antorcha de, 506
en capa fina, 453
herramienta para reciclaje, 507
no transferido, 505
vitrificación por, 504
Plásticos, 809
agrícolas, 1020
reciclado, 1021
usados, 1022
biodegradables, 1028
de procedencia agrícola, 810
del automóvil, 1079
generación de residuos, 817
reforzados, 1001
residuales, 999
aditivos, 1003
agrícolas, 1020
código y características, 1005

consumo estimado, 1001
de plasticultrua, 1020
en automoción, 1017
en la construcción, 1017
flujo de, 1011
municipales (envases), 1012
productos a partir de, 1024
reciclado de tuberías, 1018
reciclado mecánico/energético, 1023, 1027
reducción de tamaño, 1024
termoestables, 1003
termoplásticos, 1002
tipos y características, 1001
vías de, 1023
Platino, recuperación de metales, 472
Plomo tetraetilo, 1065
Poder,
calorífico de residuos, 844
puzolánico, 293
Policarbonato, 1020
Poliestireno, 1010
de alta densidad, 1006
de baja densidad, 1006
para impermeabilización, 1108
tereftalato (PET), 1007
Polihidroxialcanatos, 1029
biodegradabilidad del, 1030
Polimerización, técnicas de, 127
Polímeros,
cristalinos, 1002
de adicción, 1007
de uso industrial, nomenclatura, 999
natural, 999
polares, 1002
reforzados con fibra, 309
termoestables, 1002
Poliolefinas, fabricación de, 626
Polipropileno reforzado, 308
Poliuretano expandido, 335
Polvos,
atomizado, naturaleza de los, 406
de aceria, 362, 469
características, 1138
gestión de los, 1140
humos primarios, 1138
métodos hidrometalúrgicos, 1141
procedimientos pirometalúrgicos, 1141
de chatarras, 470
de filtros, vitrificación de, 465
de fundición de cobre, vitrificación de, 478
de convertidor, 410
de piel curtida, 199
de vidrio, aislantes, 285
de zinc, 470
fluorescente, 466
fosforescente, 1043
Porcelana de huesos, 360
Porosidad,
cerrada, 272
generación de, 119
Portador de nutriente, 321
Potencia calorífica inferior, calculo, 771
Potencial eutrofización del suelo, 142
Praderas de pastoreo, 572
Precipitación química, 108
Presión hídrica, umbral de, 12
Prevención de la contaminación en origen, 50
Principios activos, 249
Priones anormales, 231
Problemas medioambientales, 36
Procedimientos pirometalúrgicos, 1141
Proceso(s),
anaerobios, 138
agentes que inhiben los, 873
biocatalíticos, 618
cerámicos, 121, 918
limitaciones, 920
seguridad de los, 921
de bioflotación, 148
de combustión de RSU, 849
de clorolisis, 206
de esterificación, 713
de nitrificación-desnitrificación, 190
de oxidación avanzada, 122
de quimisorción, 102
de residuo cero, 991
energéticos y contaminación, 930
extractivos de minerales, tipos de, 674
fotosintético, 923
hidrometalúrgico, 1059
Sharon-Anmmox, 191
Producción,
industrial, análisis de la, 55
más limpia, 50
metodologías de minimización, 50
Producto(s),
comerciales, compuestos tóxicos, 820
decapantes para pinturas, 821
desengrasante de metales, 822
disolventes para la extracción de, 822
disolventes para la limpieza en seco, 821
fabricación de productos de aseo, 822
pigmentos para esmaltes y colorantes, 821
de flotación, 693
de la Combustión Incompleta, 956
de revelado, 211
de tostación, 693
fitosanitarios, 626, 1020
prefundido, 454
químicos,

del hogar, 128
persistentes, 571
reciclados, uso de los, 253
Programa,
biomasa Nipon, 808
de las Naciones Unidas para el medio ambiente, 50
Protocolo de Kyoto, 10, 355
Pulido del gres porcelánico, 353
Pulpa, calidad de la, 298
Pulpeado semiquímico, 299
Punto(s),
de inflamación, 93
limpios, 829, 835
verde, 64, 800, 835
materiales admitidos, 836
precio del, 64
resultados de la aplicación, 802
tarifas y repercusiones del, 801
Purines,
características, 184
composición, 184
de cerdo, 138
plantas de tratamiento de, 610
valorización energética, 187
Puzolanas,
artificiales, 388
de los minerales de arcilla, 389
escorias metálicas, 391
naturales, 386
actividad, 387
cementos compuestos con, 393
residuos con propiedades, 386
propiedades de la sílice residual, 394
propiedades de los residuos, 390
PVC, 1008
PYMES, aplicación de las, 55

Quemaduras por productos químicos, 528
Química,
industria, 614
básica, 619
impacto ambiental, 622
inorgánica, residuos, 620
transformadora, 619
y desarrollo sostenible, 630
oceánica, 419

Radiación(es),
absorción de, 466
ionizantes, 554
UV, 205
Radionucleidos, retención de, 1153
RAEE (residuos de aparatos eléctricos y electrónicos), 1042
gestión y tratamiento, 1042
sistema de reciclaje, 1045
frigoríficos y congeladores, 1045
tratamiento selectivo, 1043
Rankine, ciclo de, 854
orgánico de, 418
Rayada, resistencia al, 512
RDF (combustibles derivados de residuos),
caracterización del, 845
definición oficial del, 845
especificaciones de los, 845
sistemas,
de combustión del, 853
de preparación, 852
Reacción(es),
en estado sólido, 133
expansivas, 296
inorgánica, valorización, 917
REACH, reglamento, 796
Reactores,
del tipo MOX, 1149
lodos de, 618
Recauchutado del neumático, 1082
Reciclado,
ahorro de energía en el, 68
de pañales, 231
de plásticos agrícolas, 1021
de materiales procedentes de derribo, 1103
de tuberías plásticas, 1018
los límites, 68
mecánico/energético de plásticos, 1027
por fusión de escorias, 568
químico de plásticos, 1025
tratamientos, 1026
Reciclaje, 67
ahorro de energía en el, 68
aplicaciones del ACV, 80
barreras al, 789
de aparatos electrodomésticos, 1035
de cables, 1035
de circuitos impresos, 1054
de lámparas, experiencia internacional, 1037
de materiales en Europa, 243
de neumáticos, 1081
de residuos mineros, 662
de transformadores, 1035
director, 242
en la construcción, 1091
evolución, 1095
perspectivas, 1098
residuos de una demolición, 1101
residuos obra nueva, 1101
tratamiento, 1094
indirecto, 242
limites del, 27
multidisciplinar, 98, 242
y la ciencia de los materiales, 28

Recuperación de nutrientes, 188
Reducción química, 111
Refino de petróleo, residuos del, 203
Reforestación, crédito de, 36
Regeneración,
del carbón, 102
de los baños electrolíticos, 212
Régimen mesofílico, 139
Registro Inventario Europeo de Emisiones contaminantes (EPER), 9
Reglamento REACH, 796
Relleno sanitario, 889
Remolacha, concentrado de, 314
Residuo(s), 67
aceitosos de navegación, 214
agrícolas y forestales, 699
impacto ambiental, 743
aislantes fabricados con, 327
caracterización para su valoración energética, 769
catálogo, 70, 181
cero, 26
noción de, 26
clasificación, 72
codificación de, 181
combustibles, caracterización, 850
competencia administrativa, 22
con disolventes halogenados, 206
con propiedades puzolánicas, 386
con radionúcleos, 480
de aceite, 214
de alta toxicidad, vitrificación de, 481
de alta y media intensidad, 481
de animales, 231, 950
de ánados, 366
de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), 1019
de centrales,
termoeléctricas, 554
termonucleares
de corteza y corcho, 192
de deyecciones humanas y del ganado, 950
de flotación, 680
de la construcción y demolición, 216, 1091
gestión de, 1101
hormigón, 633
material reciclado para subbases, 1105
trituración, 1105
de la industria,
azucarera, 390
textil, 193
de la instalaciones y plantas externas, 216
de minería,
presas de, 538
vitrificación, 477
de los bivalvos, 861, 862
de los tratamientos de conservación de la madera, 192
de metales y plásticos,
moldeado y tratamiento de superficie, 213
de plasma, tratamiento, 504
de plasticultura, 1020
de yeso, valorización, 329
del refino de petróleo, 203
densos inorgánicos, 344
domiciliarios, 804
empleados en vitrocerámicos, 514
en la fabricación del acero inoxidable, 569
fabricación,
de pegamentos, sellantes y tintas, 207
de revestimientos, 207
fermentables, 830, 864
tipos de, 866, 949
difícilmente degradables, 949
fácilmente fermentables, 949
fangos de EDAR, 950
materiales celulósicos, 950
residuos de animales, 950
residuos de deyecciones humanas y anado, 950
fertilizantes, 326
forestales,
poda y tala, 755
valorización, 750
fosfáticos, 359
galvánicos, virificación, 476
generación de, 23
gestión de, 23
radiactivos, 487
evolución en la, 47
higienización primaria del, 864
homogéneos, y contaminados, tratamiento, 876
eficiencia energética, 876
industria,
alimentaria, 313
fotográfica, 211
industriales, 248
ganaderos, 735
inertización por medio de vitrificación, 442
infecciosos, 237
inorgánicos,
de procesos térmicos, 211
que contienen metales, 212
jerarquización de opciones para el tratamiento de, 47
ley 10/98, 18
ligeros, 263
líquidos, 13, 651
material a partir de, 67
metalúrgicos, aplicaciones, 410
mineros,
gestión de basas y escombreras, 535
labores de concentración, 535
legislación, 695
por proceso, 679

Residuos (Contaminación),
reciclaje, valorización, 662
minimización de, 487
municipales, 218, 787
fermentables, 787
productos tóxicos sólidos, 787
naturaleza del, 96
orgánicos,
generación de, 575
vegetales, 578
peligrosos y contaminantes urbanos,
contaminación ambiental, 823
daños personales, domésticos y a equipos, 824
destino de, 826
estimación de riesgos, 825
gestión de, 825
lesiones profesionales, 825
urbanos, problemas ocasionados, 823
petrolíferos, 625
plásticos,
flujo, 1011
municipales, 1012
potencialmente peligrosos, 235
constituyentes, 228
procesos químicos,
inorgánicos, 205
orgánicos, 206
radioactivos, 483,1147
almacenamiento geológico profundo, 1148
alta radioactividad, 481
baja radioactividad, 481
barreras de ingeniería 1150
características radiológicas, 481
clasificación, 1147
de alta actividad, gestión, 487
de baja y media actividad, 1147
estabilidad tectónica, 1152
estrategias de gestión, 1148
exposición a las radiaciones, 484
gestión, 487, 1147
naturaleza de los vidrios, 485
producción de baja y media actividad, 484
retención de radionucleidos, 1153
sistema multibarrera, 1150
transmutación de los isotopos radioactivos, 1149
vitrificación de, 483
reducción de toxicidad, 46
ricos en proteínas, 950
sanitarios,
clasificación, 237
identificación por áreas, 237
tratamiento de, 239
secundarios, 130, 605
sólidos urbanos (RSU),
aspectos nutricionales, 867
cálculo del poder calorífico, 843
como combustible, 842
composición típica, 842
composición y evolución, 803
compuestos tóxicos, problemas, 795
contenedores, 792
costes de gestión,
comportamiento ciudadano, 904
de incineración, 904
de recogida y transporte, 903
en vertido, 903
en Ecoparc, 904
recogida selectiva, 903
densidad aparente, 806
destrucción térmica, 845
domiciliarios, composición media, 804
evolución en la composición, 813
fracción(es),
orgánica de los, 742
potencialmente reciclables, 833
generación de los, 805
generados por las Comunidades Autónomas, 807
gestión de los, 39
en España, 814
en Europa, 815
incineración,, 848
minimización, 790
modelo español, 791
modelos de gestión, 788
naturaleza de los componentes, 807
fracción fermentable, 808
metales, 811
papel y cartón, 809
plásticos, 809
recogida selectiva, 812
vidrio, 810
normas relativas a los, 802
origen de los, 803
peligrosos, 845
plantas incineradoras, 612
proceso biolíquido, 898
producción de olores, 867
propiedades biológicas, 866
recogida,
neumática, 792
puerta a puerta, 832
selectiva, 790, 832
restricciones al vertido en masa, 841
separación,
húmeda, 897
por flotación, 898
sistemas,
de conversión bioquímicos, 863
de desgasificación, 788
tamaño de los componentes, 795

tasa de recuperación de fracción, 813
tipología de los integrantes de los, 183, 828
transportes y compactación, 793
tratamiento en España, 826
tratamiento térmico, 791, 839
tratamientos,
con cal, 900
costes de, 903
higienización por vapor, 900
sistema termoneumático, 900
vertido, 791
y energías renovables, 904
soporte cerámico, 324
aplicaciones, 325
aspectos económicos, 325
fabricación, 324
ventajas medioambientales, 325
soportes agrícolas, 323
sustancias orgánicas disolventes, 216
tóxicos y peligrosos, 21, 73
incineración, 49
urbanos, 819
caracterización, 822
posibilidades y valorización, 840
propiedades ignífugas, 820
vitrificables, 431
vitrificación con, 461
Resinas,
de intercambio iónico, 103
selectivas, 104
sintéticas, 100
Resistencia a la llama, 275
Retardantes de llama, 31, 1004
bromados, 1019
Retículo,
modificadores del, 343
óxidos co-formadores de, 344
Revegetación,
de suelos, método, 1136
de taludes, 1110
Ribera, proceso de, 590
Riesgo de expansión, 549
Riley, zona de, 544
Roca(s),
industriales en la construcción, 640
áridos principales, 641
madre, 346, 460
ultraferromagnésicas, 459
Rodenticidas, 588
Rotura ácida de la emulsión, 213
RSU (ver *Residuos sólidos urbanos*)
Rueda de Deming, 53
Ruido,
acciones contra el, 655
y salud, 334
Sales,
de cianuro, 367
fotográficas, 211
sólidas cianuradas, 621
Saponificación de impurezas, 600
SDDR (sistemas de depósito, devolución y retorno), 1013
Secadores,
de contacto, 971
por convección, 971
Sedimentos,
en los tanques de los buques, 205
problemática ambiental lodos, 519
valorización de, 528
vitrificación al tratamiento de, 517
aspectos cualitativos, 518
aspectos cuantitativos, 519
cantidad y naturaleza, 518
evaluación carga contaminante, 518
problemática inherente, 519
Seguridad contra incendio de estructuras metálicas, 401
Semiconductores,
extrínsecos, 452
intrínsecos, 452
intervalo prohibido de energía, 452
Separación con membrana, 148
Separadores de metales, 1071
no férreos, 1072
por aire, 1071
Servicios medioambientales correctos, 252
Sharon-Anammox, proceso, 191
Sherwood, diagrama de, 240
Siderometalúrgica,
residuos, 559
valorización de residuos, 558
Silicato cálcico, residuos en su fabricación, 329
Sílice,
amorfa, 131
de origen industrial, 294
de origen vegetal, 293
goles de, 293
pirogénica, 293
reactiva, 294
residual, propiedades puzolánicas, 394
vaporizados, compuestos de, 887
Silicio, eliminación de, 109
Siloxanos, presencia de, 887
Síntesis,
de Fischer-Tropsch, 1067
de novo, 382
hidrotérmica, 408
Sistema(s),
de gestión,
ambiental, 52
integrado, 64

de producción, gestión ambiental, 50
FIFO, 60
integrado de gestión, 1013
MBR, 143
termoneumático, 900
Waelz, 569, 1141
Smog fotoquímico, 145
Sobrefertilización inorgánica, 913
Solidificación, 126
Sólidos,
disueltos, 937
en suspensión, 937
Soluciones,
ácidas,620
y básicas, 205
catiónicas, 621
poliméricas, 623
salinas, 620
Sostenibilidad, 32, 756
SOx, emisión de, 500
Stripping,
absorción, 189
de purines frescos, 189
por aire, 118
por vapor, 118
Suelo(s),
afectación del, 5574
como recurso, el, 745
efectos ambientales, 746, 748
contaminados, 249
contaminantes, 1120
control de inundaciones, 1118
de origen agrícola 1120
de origen industrial. 1119
degradar hidrocarburos, 1127
edad de la contaminación, 1131
inoculación de bacterias, 1127
inventarios, 1116
inyección de aire, 1127
lavado, 1122
limpieza de, 250
método de revegetación, 1136
pasivos industriales, 1136
posibilidades de valorización, 1115
proyecto de contaminación, 1135
reciclado de, 1132
reciclabilidad, 250
recuperación de, 1107
reutilización de, 1137
riesgo residual, 1135
sellado de los, 1117
sistemas de tratamiento, 1121
tratamientos químicos, 1125
vertido de residuos, 1111
degradación del, 574
degradados, recuperación de, 716
edáfico, 643, 655
excavados, 1132
radiante, calefacción por, 416
subsidencia de, 671
vitrificación de, 509
Sulfatos, resistencia a los, 374
Sumideros y valoración de CO2, 419
Superconductos cables, 30
Superficies quemadas, 869
Surfactantes no degradables, 601
Sustancias,
humitas, 322
inflamables, 93
inmiscibles, separación de, 104
patógenos en RSU, 155
quelantes, 1128
Sustratos,
fermentables, 714
obtención, 157
orgánico, estabilización de, 868

Tableros aglomerados, 587
Taludes,
construcción de, 556
estabilidad de, 543
reconstrucción morfológica de, 655
revegetación e impermeabilización, 1110
Tamices moleculares, 291
Taninos sintéticos, 594
Tank leching test, 178
Tanques
de los buques, sedimento en los, 205
de relaves, 667
Técnicas,
biológicas, 137
energéticas, 136
fisicoquímicas, 118
químicas, 108
serigráficas, 354
Tecnologías,
aplicables, 341
Fenton, 112
limpias, 51
Tejido parenquimatoso, 305
Teléfonos móviles, 791, 1041
Temperatura de llama, 776
Térmicas,
de carbón, 552
de lignito, 552
de petróleo, 553
Termoestables, 1003
Terraplenes, construcción de, 543
Terrazas con estériles, 663
Terreno confinante, 1113

Test estándar de lixiviación, 72
Textil, industria, 596
  compuestos tóxicos, 601
    acabados pirorretardantes, 601
    surfactantes no degradables, 601
  fuentes de alcalinidad/acidez, 602
  fuentes de emisión, 602
  impacto ambiental, 600
    fuentes de residuos, 600
  lana bruta, 596
  materias primas,
    algodón, 597
    fibras, 597
  procesos de fabricación,
    acabado funcional, 599
    productos adhesivos, 599
    reforzamiento de alfombras, 599
  procesos en seco o con poco agua.
    engomado, 598
    hilado, 597
    punzonado, 597
    tejido de punto, 598
    tejido plano, 598
  procesos principales ambientales, 603
    preparación de hilado, 603
    recepción materias primas, 603
  residuos de los, 193
  teñido continuo, 601
  teñido discontinuo, 601
Tranques de relaves, 667
Tiempo de residencia de los gases, 136
Tintorerías de lavado en seco, 209
Tortas de filtración y lodos, 619
Toxicidad y reciclaje, 94
Tóxicos del hogar, 247
Transesterificación catalítica, 224
Transferencia de calor, 271
Transformadores,
  eléctricos, 1036
  reciclaje de, 1035
Transgénicos,
  aspectos ambientales, 34
  para absorber CO2, 35
Transmisión de calor, coeficiente integral de, 275
Transposición de especies, 204
Tratamiento térmico en digestores, 232
Tricloroetiline, recuperación de, 625
Trituración criogénica, 1084
Tubos catódicos, 465, 1043
  absorción,
    de calor,466
    de radiaciones, 466
    residuos de vidrios, 466
  fluorescentes, recogida de, 1038
Ultrasonidos, usos, 925
Umbral de presión hídrica, 12
Unión Europea, problemas medioambientales comunes, 36

Valorización(es),
  agrícola directa, 187
  agronómica, 572
  cerámicas, 133
  de residuos, balance ambientales, 70
  energéticas, 954
Van der Waals, fuerzas de, 101
Vapor,
  aprovechamiento del, 723
  desinfección por, 239
  higienización por, 239
  turbina de, 723
Variedades transgénicas, 753
Vaso,
  de vertido de vertederos, 890
  del depósito, 1108
Vegetales,
  congelados, 575
  industria de transformados, 574
  modificados genéticamente, 699
  no madereros, 304
Vehículos,
  catalizadores agotados, 1077
  desguace selectivo, 1075
  fragmentación, 1075
  fuera de uso, 1061, 1073
    plásticos, 1079
    reciclaje de, 1075
    valorización energética, 1078
  híbridos, 1064
  residuos,
    de la fragmentación de, 362
    líquidos, 1076
Velocidad de disolución, 176
Vermicompostaje, 871
Vermiculita exfoliada, 402
Vertedero(s),
  barreras de ingeniería en los, 879
  controlados, 82, 879
    o relleno sanitario, 889
  de inertes, 893
  de RSU, 607
    recuperación de energía, 607
  de superficie, 1111
    depósitos controlados de clase II, 1111
  depósitos subterráneos, 882, 1112
  desgasificar, obligación de, 880
  directivas relativas al vertido, 892
  efluentes de los, 881
  elementos para la confección, 1107

emisiones de metano, 887
entidad explotadora, 882
explotación de, 890
gas para obtener hidrógeno, 885
geomembrana sintética, 890
hundimiento en los, 896
impacto ambiental, 605, 882, 1114
impermeabilidad natural de los terrenos, 890
mezclas explosivas, 881
no controlados, 791
para residuos peligrosos, 892
secos, 895
de balas de RSU, 896
vaso de vertido, 890
Vertidos,
en masa, restricciones, 841
preparación de la zona, 1112
pretratamientos previos, 893
hidrólisis ácida, 894
mecano/biológicos, 894
requerimientos, 1112
y ciclo de vida, 82
Vía húmeda, 689
Vibraciones, acciones contra las, 655
Vidrio(s), 29
agente espumante, 285
aislantes, 285
capacidad de recristalización, 439
cascotes de, 386
celular, 286, 357
color y reciclado, 439
con plantilla, 442
cristalizaciones secundarias de, 513
de los RAEE, 465
de óxidos, 436
de sílice, 434
desvintrificación controlada de, 510
especiales, reutilización, 465
espumoso, 285
formación del, 431
punto de fusión, 432
formadores de, 343
fórmula molar y porcentual, 436
microesferas de, 355
mosaico de, 356
naturaleza, 431
óxidos formadores de, 345, 434
para residuos radioactivos, 485
pérdida de constituyentes por volatilización, 438
presencia de gases en los, 445
afinado químico, 446
reciclaje del, 355
residuos de, 351, 817
tensión superficial, 434, 438
velocidad de enfriamiento, 439
viscosidad, 438
cinemática, 438
de los componentes, 433
Vinícola, industria, 584
Viscosidad de un líquido fundido, 433
Vitrificación, 123, 344
arenas de fundición, 462
aspecto técnicos y económicos, 515
aspectos ambientales, 492
edición de metales, 501
elementos radioactivos en rocas, 504
emisiones, 493, 495, 497, 500, 501
límites de emisión y depuración de gases, 498
monóxido de carbono, 499
movilidad de un elemento, 503
pantallas de TV, 494
partículas sólidas sedimentables, 495
aspectos energéticos, 488
comparación de sistemas, 492
con residuos, 461
continua o intermitente, 501
coste sistema eléctrico y de gas, 516
de cenizas de biomasa, 472
de fangos de EDAR, 473
de materiales radioactivos, 483
de residuos,
de alta toxicidad, 481
de arsénico, 446
de minería, 477
galvánicos, 476
radioactivos, 483
secundarios, 989
de suelos, 509
desarrollo de los eutécticos, 445
intervalo, 445
empleo de lodos, 525
horno de, 989
in situ, 431, 508
inertización de residuos por medio de, 442
limitaciones de la, 460
polvos de filtros, 465
por plasma, 504
resistencia al ciclo hielo/deshielo, 459
reutilización de vidrios especiales, 465
superficial, 459
tecnología industrial, 454
total, 459
tratamiento,
de la fracción sólida, 529
de sedimentos, 517
valorización por, 134, 525
y los halógenos, 461
Vitrificador,
estructura del balance térmico, 488
calor de fusión, 489

enriquecimiento en oxígeno, 491
oxicombustión, 492
pérdidas por fusión, 489
tiempo de residencia del vidrio, 489
uso de residuos en la fusión, 489
tipos de, 455
Vitrificado(s), 446
a granel, 450
acabado de los materiales, 450
anomalía del boro, 440
aplicaciones fotovoltaicas, 452
materiales semiconductores intrínsecos, 452
plasma en capa fina, 453
semiconductores extrínsecos, 452
conformado en forma de baldosa, 450
constitución de los, 434
destino del, 530
formulación de, 443, 453
implicaciones económicas y ambientales, 530
in situ, 123
lixiviación de los productos, 458
materiales fibrosos, 451
producción con residuos de amianto, 461
propiedades,
durante la fusión, 437
mecánicas, 441
químicas, 440
resistencia a la acción de los ácidos, 440
tensiones térmicas, 450
textura, 453
Vitrocerámicos, 510
esmaltes para cerámica, 514
microestructura de, 511
para usos,
arquitectónicos, 213
industriales, 514
propiedades, 511
residuos empleados en, 514
resistencia,
a la abrasión, 512
al choque teórico, 512
al rayado, 512
técnicos, 213
vías de producción de, 513
Vivienda, buena practica energética, 267
Vulcanización, reacción de, 1081

Waelz,
escoria granular, 1142
horno, 1143
óxido de, 470
sistema, 569, 1141

Yacimientos mineros horizontales, 676
Yeso,
FGD, 330
residual, 132
valorización de residuos de, 329

Zeolitas, 291
cemento de, 292
lecho de, 291
Zinc, polvos de, 470
Zn,
recuperación de, 569
y pb, recuperación de, 1141
Zona de Riley, 544

Este libro, ampliación del que se editó en 1999, constituye una guía para conocer las tecnologías usadas para el reciclaje de residuos. En una época que apunta al progresivo agotamiento de las materias primas y al incremento desmesurado del consumo, la presente obra pasa revista a toda una serie de posibilidades de recuperar materiales de los residuos de manera respetuosa con el medio ambiente.

La publicación se estructura en tres partes. En la primera, después de una necesaria introducción sobre el impacto que en el medio ambiente ha podido provocar el mal uso de la tecnología, también se expone como la tecnología puede contribuir a remediar el daño, y así se definen las tecnologías disponibles para el reciclaje de residuos y se señalan los límites de aplicación dentro de un contexto respetuoso con el medio ambiente.

La segunda parte, pasa revista a la lista de residuos, de acuerdo con la clasificación establecida por el Catálogo Europeo de Residuos y, atendiendo básicamente a su naturaleza orgánica o inorgánica, así como a las posibilidades de reciclaje que ofrecen de acuerdo con las tecnologías descritas anteriormente.

La tercera parte, la más extensa, dedica un capítulo a cada una de las gamas de materiales reciclados que pueden lograrse con residuos industriales, residuos domiciliarios (RSU), fangos de depuradora, residuos mineros, biomasa residual, etc. Cada uno de estos capítulos, hasta un total de diez, está lleno de ejemplos prácticos de reutilización de residuos. También se hace mención al estado de la tecnología mundial sobre tratamiento de residuos, sí como sus previsibles tendencias.

Finalmente, la obra incluye un glosario, con más de 3.000 entradas, que constituye un diccionario de terminología ambiental muy útil para efectuar consultas rápidas.

Xavier Elias Castells, es Ingeniero Industrial por la ETSII de Barcelona (Universidad Politécnica de Cataluña). Su actividad profesional se desarrolla en diversos ámbitos. Es Director de la Bolsa de Subproductos de Cataluña y asesor de diversos gobiernos sud-americanos en temas ambientales. En la vida profesional ha dirigido Ingenierías donde se han proyectado y construido numerosos secaderos y hornos, tanto de proceso como de incineración y vitrificación de residuos.

En el área docente es profesor de cursos de doctorado y postgrado sobre temáticas de reciclado y tratamiento de residuos: Instituto Químico de Sarriá (Tecnología del Medio Ambiente), Instituto de Tecnología de Cataluña y profesor invitado en numerosas Universidades Españolas y Sudamericanas.

Ha publicado Tratamiento de valorización energética (Ed. Díaz de Santos) y es el Director de los Másters a distancia: «Ingeniería Ambiental» y «Ciencia y Tecnología Cerámica», ambos de la Fundación Universitaria Iberoamericana.

Es Vocal del Consejo Asesor de Calidad Ambiental del Departamento de Medio Ambiente del Gobierno Autónomo Catalán, Miembro de las comisiones de Medio Ambiente de numerosos colegios profesionales, Asociaciones, Corporaciones, etc.

ISBN 978-84-7978-835-3

9 788479 788353

E-mail: ediciones@diazdesantos.es
http://ediciones.diazdesantos.es